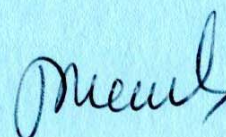


**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ФІЗИКО-ТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ НИЗЬКИХ ТЕМПЕРАТУР
імені Б. І. ВЕРКІНА**

ЖЕКОВ Костянтин Ростиславович



УДК 534.6.08: 534.08: 534-8: 534-16

**МАГНІТОПРУЖНІ ЕФЕКТИ В РІДКІСНОЗЕМЕЛЬНИХ
БОРОКАРБІДАХ ТА ФЕРОБОРАТАХ**

01.04.07 – фізика твердого тіла

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Харків - 2020

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у відділі магнітних і пружних властивостей твердих тіл Фізико-технічного інституту низьких температур імені Б. І. Веркіна Національної академії наук України, м. Харків.

Науковий керівник:

кандидат фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник,
Звягіна Гаїна Анатоліївна,
Фізико-технічний інститут низьких температур
імені Б. І. Веркіна Національної академії
наук України,
старший науковий співробітник відділу
магнітних і пружних властивостей твердих тіл

Офіційні опоненти:

доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник,
Пащенко Олексій Валентинович,
Донецький фізико-технічний інститут
імені О. О. Галкіна Національної академії
наук України (м. Київ),
провідний науковий співробітник відділу
фазових перетворень

кандидат фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник,
Шипкова Ірина Геннадіївна
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут» МОН
України,
старший науковий співробітник кафедри фізики
металів та напівпровідників

Захист відбудеться «28» січня 2020 р. о 15:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.175.03 при Фізико-технічному інституті низьких температур імені Б. І. Веркіна Національної академії наук України за адресою: 61103, м. Харків, пр. Науки, 47.

З дисертацією можна ознайомитись у науковій бібліотеці Фізико-технічного інституту низьких температур імені Б. І. Веркіна Національної академії наук України за адресою: 61103, м. Харків, пр. Науки, 47.

Автореферат розісланий «26» грудня 2019 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 64.175.03



О. І. Юзефович

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Зусилля світової наукової спільноти останнім часом зосереджені на проблемах пошуку та синтезу нових класів структур, які б мали необхідні фізичні та прикладні характеристики, а також на розумінні фундаментальних процесів та явищ, що зумовлюють їх природу.

Сполуки на основі перехідних металів виявляють низку унікальних властивостей, досить важливих для вирішення проблем сучасної фізики твердого тіла та створення новітніх технологій. Це – колосальний негативний магнітоопір, високотемпературна надпровідність, зворотна надпровідність, магнітоелектричний та магнітоп'єзоелектричний ефекти, магнітоємність і т. ін.

Особливий інтерес представляють дві групи сполук на основі бору, що містять рідкісноземельні (РЗ) елементи та іони групи заліза, які інтенсивно досліджуються в останні роки. Це – нікелеві борокарбіди типу RNi_2B_2C і фероборати $RFe_3(BO_3)_4$ ($R = Y, Pr - Yb$). Кристали обох груп характеризуються можливим співіснуванням декількох типів упорядкування. Більшість сполук RNi_2B_2C є магнітними надпровідниками з порівнянними температурами переходів у надпровідний і магнітовпорядкований стан. Діелектричні фероборати – мультифероїки, що демонструють сегнетоелектричний, магнітний та/або сегнетоеластичний типи упорядкування.

Наявність різних типів упорядкування в кристалах обох груп відкриває можливості ефективного керування властивостями цих об'єктів за допомогою зовнішніх впливів. Зокрема, магнітоелектричний ефект, що спостерігається в фероборатах, дає можливість змінювати електричну поляризацію під впливом магнітного поля і, навпаки, змінювати намагніченість матеріалу під впливом електричного поля. Це робить фероборати перспективними об'єктами для можливого практичного застосування при створенні пристроїв мікроелектроніки, зокрема, спінтроніки, пристроїв незалежної пам'яті і т.д.

Співіснування надпровідності й магнетизму, що спостерігається в борокарбідах, – явище досить незвичне, оскільки, як відомо, в звичайних надпровідниках магнітне поле руйнує надпровідність. Отже, ці сполуки є важливими з точки зору дослідження фундаментальних аспектів надпровідності та її взаємодії з магнітним порядком. До них відносяться, зокрема, проблеми виникнення магнітного порядку при наявності надпровідності, умов сумісності та конкуренції цих явищ, природи обмінної взаємодії між магнітними іонами і електронами провідності, роль спін-орбітальної взаємодії та ін.

Слід відзначити, що магнітні властивості кристалів RNi_2B_2C і $RFe_3(BO_3)_4$ – багаті та різноманітні. Вони обумовлені присутністю в сполуках магнітних іонів з недозаповненими d- і f-оболонками - іонів групи заліза та рідкісноземельних іонів. Магнітні іони в кристалах взаємодіють за допомогою непрямого обміну – локалізованих електронів у разі фероборатів, або через електрони провідності в разі борокарбідів. Магнітні структури, що реалізуються в цих сполуках при низьких температурах, демонструють широкий спектр конфігурацій: колінеарні антиферомагнітні фази, неспівмірні спіральні структури, слабкий феромагнетизм і

т.д. Особливий інтерес представляють фазові переходи (ФП), що реалізуються в сполуках, як спонтанно при зміні температури, так і в присутності магнітного поля.

Широке розмаїття ефектів, притаманних кристалам обох груп, зумовлене сильним зв'язком між спіновою, зарядовою та пружною підсистемами цих сполук, і тому з'ясування ролі кожної підсистеми, а також механізмів взаємодії між ними є важливим для фізики твердого тіла.

До теперішнього часу накопичено значний обсяг інформації про магнітні та електронні властивості речовин цих класів. Проте, відомості про поведінку фононної підсистеми обох груп сполук в літературі практично не представлені. Саме тому дослідження пружних властивостей та магнітопружних ефектів в РЗ борокарбідах та фероборатах, безсумнівно, є **актуальними** та визначають тему дисертаційної роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження, які склали дисертаційну роботу, виконані у відділі магнітних і пружних властивостей твердих тіл Фізико-технічного інституту низьких температур імені Б. І. Веркіна НАН України в рамках тематичного плану інституту відповідно до відомчих тем: «Електронна фізика сучасних провідних систем» (номер держреєстрації 0101U006271, термін виконання 2001-2003 рр.), «Низькотемпературні властивості фероїків із сильно взаємодіючими підсистемами» (номер держреєстрації 0101U006270, термін виконання 2001-2003 рр.), «Дослідження фундаментальних транспортних, магнітних та пружних властивостей нових провідних та надпровідних сполук» (номер держреєстрації 0102U003101, термін виконання 2002-2006 рр.), «Фізика квантових електронних явищ в провідних системах» (номер держреєстрації 0104U003036, термін виконання 2004-2006 рр.), «Квантові електронні явища у нових провідних системах» (номер держреєстрації 0107U000945, термін виконання 2007-20011 рр.), «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.).

Мета та задачі дослідження. Основною *метою* даної роботи є виявлення і аналіз особливостей пружних властивостей та магнітопружних ефектів, що проявляються в монокристалах РЗ нікелевих борокарбідів RNi_2B_2C ($R = Y, Ho, Lu, Er, Gd$) і фероборатів $NdFe_3(BO_3)_4$, $Nd_{1-x}Dy_xFe_3(BO_3)_4$ ($x = 0,25; 0,4$) при низьких температурах, в тому числі поблизу фазових перетворень магнітної природи.

Об'єкт дослідження – механізми взаємодії фононної та магнітної підсистем у деяких представниках сімейств РЗ нікелевих борокарбідів і фероборатів при низьких температурах.

Предмет дослідження – пружні характеристики борокарбідів RNi_2B_2C ($R = Y, Ho, Lu, Er, Gd$) та особливості їх низькотемпературної поведінки в борокарбіді $GdNi_2B_2C$ та фероборатах $NdFe_3(BO_3)_4$ і $Nd_{1-x}Dy_xFe_3(BO_3)_4$ ($x = 0,25; 0,4$) поблизу фазових перетворень магнітної природи.

Мета роботи та стан проблеми, що вивчається, визначили наступні конкретні **завдання дослідження**:

1. Розробити методику вимірювань швидкості звуку, що дозволяє з високою точністю отримувати значення швидкості в сильно поглинаючих зразках міліметрового і, навіть, субміліметрового розміру.

2. Виміряти швидкості звуку у зразках монокристалів нікелевих борокарбідів (RNi_2B_2C , де $R = Y, Lu, Ho, Gd, Er$) міліметрового та субміліметрового розміру. Визначити компоненти тензору модулів пружності.

3. Експериментально дослідити температурну та магнітопольову поведінку швидкості та поглинання звуку в $GdNi_2B_2C$, особливо поблизу точок ФП.

4. Вивчити та проаналізувати магнітопружні ефекти в монокристалі фероборату $NdFe_3(BO_3)_4$.

5. Дослідити низькотемпературну поведінку швидкості та поглинання звуку в монокристалах фероборатів з двома типами РЗ іонів $Nd_{1-x}Dy_xFe_3(BO_3)_4$ ($x = 0,4; 0,25$). Проаналізувати особливості пружних характеристик цих сполук при реалізації в них спонтанних та індукованих зовнішнім магнітним полем ФП.

Методи дослідження. Пружні характеристики сполук, що вивчалися у роботі, досліджувалися з використанням імпульсного ультразвукового методу одночасного вимірювання швидкості та поглинання звукової хвилі, яка поширюється в кристалі. Обраний акустичний метод дозволяє вивчати вплив температури (в діапазоні 1,7-300 К) та зовнішнього магнітного поля (до 50 кЕ) на вказані характеристики досліджуваних кристалів. Температурні та магнітопольові залежності пружних характеристик записуються в режимі реального часу.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

1. **Вперше** запропоновано нову експериментальну методику високоточного визначення абсолютної швидкості звуку, яка на відміну від існуючих дозволяє працювати зі зразками субміліметрових розмірів, що сильно поглинають. Завдяки цьому **вперше** з похибкою менше 1 % отримано значення швидкостей звуку в субміліметрових монокристалах нікелевих борокарбідів (RNi_2B_2C , де $R = Y, Lu, Ho, Gd, Er$).

2. **Вперше** експериментально виявлено високу чутливість пружних модулів гадолінієвого борокарбіда до фазових перетворень магнітної природи, а також значну акустичну „невзаємність”. Ефекти пов’язуються зі значним внеском в характеристики поширення звуку його взаємодії з антиферомагнітною доменною структурою.

3. **Вперше** виявлено суттєві аномалії пружних характеристик феробората неодиму, які обумовлені реалізацією в сполуці переходу в антиферомагнітний впорядкований стан (колінеарна фаза) та в неспівмірну спіральну фазу. Перехід в неспівмірну фазу класифіковано як фазовий перехід першого роду. **Вперше** побудовано температурно-польові фазові діаграми $NdFe_3(BO_3)_4$ для двох напрямків магнітного поля, орієнтованого в базисній площині кристалу, на яких встановлено границі існування колінеарної та неспівмірної антиферомагнітних фаз.

4. За допомогою акустичних досліджень **виявлено нові** ФП в магнітній підсистемі фероборатів з двома типами РЗ іонів $Nd_{1-x}Dy_xFe_3(BO_3)_4$ ($x = 0,4; 0,25$).

Встановлено, що спонтанна та індукована магнітним полем, орієнтованим уздовж тригональної осі, перебудова магнітної структури в $\text{Nd}_{0,75}\text{Dy}_{0,25}\text{Fe}_3(\text{BO}_3)_4$ проходить шляхом двох ФП. Визначено температуру Нееля $T_N = 31,4 \text{ K}$ для кристалу $\text{Nd}_{0,6}\text{Dy}_{0,4}\text{Fe}_3(\text{BO}_3)_4$. Показано, що в ньому відсутні спонтанні спін-реорієнтаційні переходи - система знаходиться в легковісному магнітному стані.

5. **Вперше** побудовано фазові $H - T$ діаграми сполук $\text{Nd}_{1-x}\text{Dy}_x\text{Fe}_3(\text{BO}_3)_4$ ($x = 0,4; 0,25$) для різних напрямків зовнішнього магнітного поля. Діаграми мають складну структуру та містять кілька ліній ФП (і, відповідно, магнітних фаз), що характеризує досліджувані кристали як багатопідграткові антиферомагнетики.

Наукове та практичне значення отриманих результатів. Отримані в ході виконання дисертаційної роботи результати носять фундаментальний характер і поширюють уявлення про природу магнітопружних ефектів у системах із сильним зв'язком між електронною, магнітною та пружними підсистемами. Дослідження дозволяють проводити аналогії стосовно механізмів магнітопружної взаємодії в сполуках, які містять в своєму складі два сорти магнітних іонів (d- і f-елементи), а розуміння природи знайдених в роботі ефектів – прогнозувати деякі фізичні властивості кристалів таких сімейств як РЗ нікелеві борокарбіди та фероборати.

Запропонована в роботі «ноніусна» методика високоточного визначення абсолютного значення швидкості звуку може бути використана для характеристики нових, перспективних для застосування в широкому інтервалі температур, твердотільних зразків міліметрового та субміліметрового розміру. Вперше отримані значення швидкостей звуку та модулів пружності досліджуваних борокарбідів являють собою довідкову інформацію щодо фізичних властивостей монокристалів ряду $\text{RNi}_2\text{B}_2\text{C}$, де $R = \text{Y}$, та РЗ іони. Оригінальна процедура одночасного визначення фази та амплітуди високочастотних імпульсних сигналів, а також електронно-керований фазообертач з практично необмеженим діапазоном перебудови можуть бути використані при створенні пристроїв для фізичного експерименту.

Особистий внесок здобувача. Роботи [1-8], в яких представлено основні результати дисертаційної роботи, було виконано здобувачем у співавторстві. Дисертант брав безпосередню участь у розробці та створенні експериментального устаткування, в плануванні, підготовці та проведенні експериментів, систематизації експериментальних даних. Обговорення, аналіз та інтерпретація отриманих результатів, формулювання основних наукових висновків, написання статей здійснювалося разом із науковим керівником та іншими співавторами. Усі основні результати були представлені дисертантом у вигляді доповідей на наукових семінарах, радах та конференціях. Таким чином, особистий внесок дисертанта є **визначальним**.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертації доповідались та обговорювались на міжнародних та вітчизняних конференціях:

- Міжнародна конференція «Фізичні явища в твердих тілах» (Харків, 1-4 грудня 2005).
- International Conference for Young Scientists «Low Temperature Physics» (ICYS–LTP–2010) (Kharkiv, June 6-10, 2010).

- Міжнародна конференція «ЕВРИКА-2011» (Львів, 18-20 травня 2011).
- International Conference for Young Scientists «Low Temperature Physics» (ICYS–LTP–2011) (Kharkiv, June 6-10, 2011).
- IV Всеукраїнська науково-практична конференція „Актуальні проблеми прикладної фізики” (Севастополь, Україна, 18-22 жовтня 2011).
- Міжнародна конференція «Фізичні явища в твердих тілах» (Харків, 6-9 грудня 2011).
- Moscow International Symposium on Magnetism (MISM) (Moscow, Russia, 21-25 August, 2011).
- Міжнародна конференція «ЕВРИКА-2012» (Львів, 19-22 квітня 2012).
- "36 совещание по физике низких температур" (Санкт-Петербург, Россия, 2 -6 липня 2012).
- "Critical Phenomena under Extreme Impact" (Kharkiv, September 10-13, 2012).
- Міжнародна конференція «ЕВРИКА-2013» (Львів, 15-17 травня 2013).
- International Conference for Young Scientists «Low Temperature Physics» (ICYS–LTP–2013) (Kharkiv, June 3-7, 2013).
- Moscow International Symposium on Magnetism (MISM) (Moscow, Russia, 29 June -3 July, 2014).
- International Conference for Young Scientists «Low Temperature Physics» (ICYS–LTP–2015) (Kharkiv, June 2-5, 2015).

Публікації. Основні результати дисертації викладено в 8 статтях [1-8], які опубліковано у провідних фахових виданнях та 14 тезах доповідей у збірниках праць міжнародних і вітчизняних конференцій [9-22].

Структура дисертації. Дисертація складається з анотації, переліку умовних позначень і скорочень, вступу, п'яти розділів, висновків, переліку використаних літературних джерел з 108 найменувань та двох додатків. Повний об'єм дисертації складає 157 аркушів. В роботі наведено 3 таблиці і 61 рисунок.

ЗАГАЛЬНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

В **анотації** стисло представлено основні результати досліджень, зазначено їх наукову новизну, наведено ключові слова, а також список публікацій здобувача за темою дисертації.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми, сформульовані мета та задачі досліджень, відзначено новизну отриманих результатів, їх фундаментальне та прикладне значення, наведені дані про особистий внесок дисертанта, а також відомості щодо апробації отриманих результатів і дані про структуру та обсяг дисертації.

У **першому розділі** дисертації «**Кристалічна структура та магнітні властивості рідкісноземельних нікелевих борокарбідів і фероборатів (Огляд літератури)**» проведено аналіз літературних даних щодо структури та основних фізичних властивостей РЗ нікелевих борокарбідів і фероборатів.

У підрозділі 1.1 наведено відомості про кристалічну структуру нікелевих борокарбідів RNi_2B_2C ($R = Y, Pr - Yb$), а також про параметри ґратки кристалів сімейства. Детально розглянуто типи магнітних структур, що реалізуються в кристалах даної групи, їх еволюція при зміні температури та під впливом магнітного поля. Проаналізовано ФП в магнітній підсистемі борокарбідів Er, Gd та Ho і дані щодо фазових $H - T$ діаграм цих сполук, які представлені в літературі.

Підрозділ 1.2 присвячений аналізу літературних даних стосовно кристалічної структури і деяких фізичних характеристик (в першу чергу, магнітних, а також теплових, діелектричних та ін.) РЗ фероборатів $RFe_3(BO_3)_4$ ($R = Y, Pr - Yb$). Проаналізовано дані про ФП магнітної природи та особливості їх прояву в поведінці намагніченості, діелектричної проникності та інших характеристик кристалів сімейства. Окремо розглянуто властивості фероборатів бінарного хімічного складу $Nd_{1-x}Dy_xFe_3(BO_3)_4$ і сполук $DyFe_3(BO_3)_4$ та $NdFe_3(BO_3)_4$, що є базовими для цього ряду.

Аналіз літературних джерел виявив суттєву нестачу систематичних даних щодо стану фононної підсистеми означених кристалів та її взаємодії з магнітною та електронною підсистемами. Саме тому дослідження пружних властивостей та магнітопружних ефектів в сполуках РЗ нікелевих борокарбідів та фероборатів є актуальними.

Другий розділ «Методика і техніка експериментальних досліджень» присвячено опису методу вимірювання швидкості та поглинання звуку в твердотільних зразках, його апаратної реалізації, конструкції кріостату, а також процедури підготовки зразків до акустичних досліджень.

У підрозділі 2.1 розглянуто запропонований в роботі метод одночасного вимірювання швидкості та поглинання звуку й принцип роботи експериментальної установки. В рамках реалізації методу розроблені: а) нова процедура одночасного визначення фази й амплітуди високочастотних імпульсних сигналів («120-градусна векторна схема») і б) електронно-керований фазообертач з практично необмеженим діапазоном перебудови.

У підрозділі 2.2 детально описана **вперше** запропонована та реалізована на практиці «ноніусна» методика вимірювання та розрахунку абсолютної швидкості звуку в зразках субміліметрового розміру. Алгоритм визначення абсолютного значення швидкості звуку складається з декількох етапів. У фіксованому інтервалі частот вимірюється фазо-частотна характеристика (ФЧХ) акустичного тракту, який складається з двох ліній затримки (крок 1). Далі за тієї ж температури вимірюється ФЧХ сендвіча (крок 2), складеного з тих же ліній затримки та зразком між ними. Різниця між ФЧХ сендвіча та ліній затримки, тобто ФЧХ зразка (Рис. 1), при відсутності в останньому інтерференційних спотворень, з необхідністю повинна зображуватися строго прямою лінією, нахил якої визначає фазову швидкість звуку

$$v = 360L / S. \quad (1)$$

В (1) v – швидкість звуку (см/сек), L – товщина зразка (см), S – нахил різницевої ФЧХ (град/Гц). Якщо кут нахилу ФЧХ зразка порівняний з кутом нахилу ФЧХ ліній затримки S_1 (0,3 і більше), то в однорідних матеріалах вимірювання можуть бути обмежені цим етапом, забезпечуючи прийнятну точність (похибка не більше 0,3%).

Однак, в однорідних, але досить тонких зразках, кут нахилу ФЧХ зразка з-за малої довжини акустичного шляху малий та не забезпечує потрібну точність. У таких випадках для визначення швидкості звуку була використана запропонована вперше "ноніусна" процедура. Нехай фаза сигналу, що реєструється на якійсь певній частоті f_0 фазометром на кроці 1 є Φ_1 . На кроці 2 на тій же частоті фаза сигналу буде Φ_2 . Повний зсув фаз, що вноситься зразком $\Phi_0 = n \cdot 360 + (\Phi_2 - \Phi_1)$, ($n = 0, 1, 2$). Оскільки $\Phi_0 = 360 \cdot f_0 \cdot L / v$, то, перебираючи значення n , знаходимо уточнене значення v , найближче до "грубої" оцінки швидкості, отриманої з (1).

Термометрія, конструкція кріостату та процедура підготовки зразків для акустичних досліджень описані в **підрозділах 2.3 та 2.4** відповідно.

Основні результати розділу опубліковано в роботі [1].

У третьому розділі «Пружні та магнітопружні характеристики рідкісноземельних нікелевих борокарбідів» наведено результати низькотемпературних досліджень пружних та магніто-пружних характеристик кристалів RNi_2B_2C ($R = Y, Lu, Ho, Gd, Er$).

У **підрозділі 3.1** наведені **вперше** виміряні з високою точністю абсолютні значення швидкостей звуку в монокристалах RNi_2B_2C ($R = Y, Lu, Ho, Gd, Er$), Таблиця 1.

Для монокристалів з $R = Y, Lu, Ho$ на підставі отриманих значень швидкостей звуку були розраховані компоненти тензора модулів пружності, температури Дебая та модулі об'ємного стиснення.

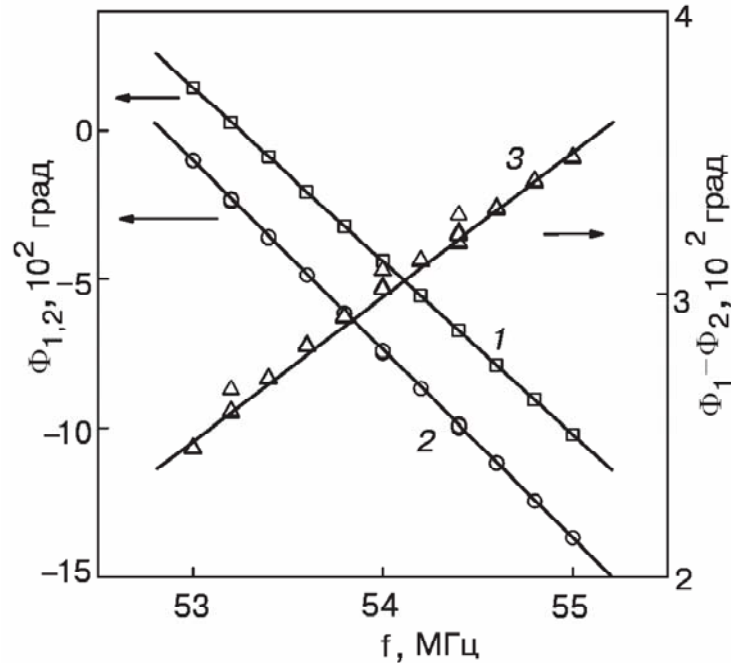


Рис. 1 Фазочастотні характеристики ліній затримки (1), ліній затримки зі зразком $LuNi_2B_2C$ ($L=0,8$ мм) (2), та різницева (3).

Таблиця 1

Швидкості звуку в монокристалах борокарбідів ($T = 77\text{ K}$) QL – квазіповздовжня мода, QT – квазіпоперечна мода. У дужках – товщина зразка в мм. "Надлишкові" дані відзначені символом *.

Поляризация		$\text{YNi}_2\text{B}_2\text{C}$	$\text{LuNi}_2\text{B}_2\text{C}$	$\text{HoNi}_2\text{B}_2\text{C}$	$\text{GdNi}_2\text{B}_2\text{C}$	$\text{ErNi}_2\text{B}_2\text{C}$
q_{\parallel}	u_{\parallel}	$V \cdot 10^5 \text{ см/с}$	$V \cdot 10^5 \text{ см/с}$	$V \cdot 10^5 \text{ см/с}$	$V \cdot 10^5 \text{ см/с}$	$V \cdot 10^5 \text{ см/с}$
[100]	[100]	6.78 (0.885)	5.88 (0.8)	6.04 (0.606)	5.65	6.07
	[001]	3.25 (0.885)	2.65 (0.8)	2.73 (0.606)	2.63	2.62
	[010]	4.80 (0.885)	4.30 (0.8)	4.33 (0.606)	3.42	3.48
[110]	[110]*	7.55 (0.59)	6.64 (0.988)	6.86 (0.525)	5.73	6.58
	[001]*	3.26 (0.59)	2.64 (0.988)	-		
	[1-10]	3.34 (0.59)	2.77 (0.988)	2.83 (0.525)	3.37	2.87
[001]	[001]	6.49 (0.84)	6.01 (0.4)	5.91 (0.23)	5.64	6.09
	[100]*	3.26 (0.84)	2.70 (0.4)	2.81 (0.23)	2.63	2.74
	[010]*	3.28 (0.84)	2.70 (0.4)	2.83 (0.23)	2.63	2.74
$45^\circ \wedge [001]$ в (110)	QL*	7.28 (0.303)	-	-		
	QT	3.18 (0.465)	-	-		
	[110]*	3.31 (0.303)	-	-		
$45^\circ \wedge [001]$ в (100)	QT	-	2.01(0.27)	-		

Підрозділ 3.2 присвячено дослідженню особливостей низькотемпературної поведінки швидкості та поглинання звуку в монокристалі $\text{GdNi}_2\text{B}_2\text{C}$ поблизу магнітних ФП, за результатами яких побудовано фазові $H - T$ діаграми сполуки для декількох напрямків зовнішнього магнітного поля (Рис. 2).

У підрозділі також обговорюється виявлена в кристалі так звана акустична «невзаємність»: у магнітовпорядкованій фазі спостерігалось розщеплення швидкості S_{44} -моди при взаємозаміні напрямків поширення та поляризації (Рис. 3).

«Невзаємність» викликається взаємодією звуку з іншими підсистемами кристала (електронною, магнітною і т.п.). Як правило, «невзаємність» в швидкості звуку, що спостерігається в металах через взаємодію з електронами, дуже мала ($10^{-4} \div 10^{-6}$). Можливою причиною виявленого в $\text{GdNi}_2\text{B}_2\text{C}$ досить сильного (10^{-2}) ефекту «невзаємності» може бути взаємодія звуку з більш-менш регулярною антиферомагнітною доменною структурою. Існуючі в таких структурах трансляційні моди мають квазіакустичний спектр із близькими до звукових характерними частотами коливань, що і забезпечує ефективну взаємодію з ними звуку.

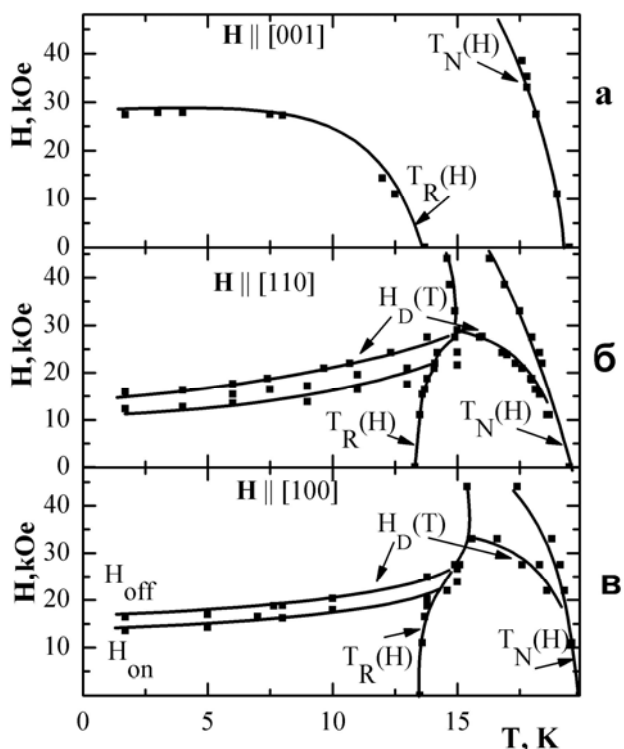


Рис. 2 Фрагменти фазових H - T діаграм монокристалу $GdNi_2B_2C$ для різних напрямків поля.

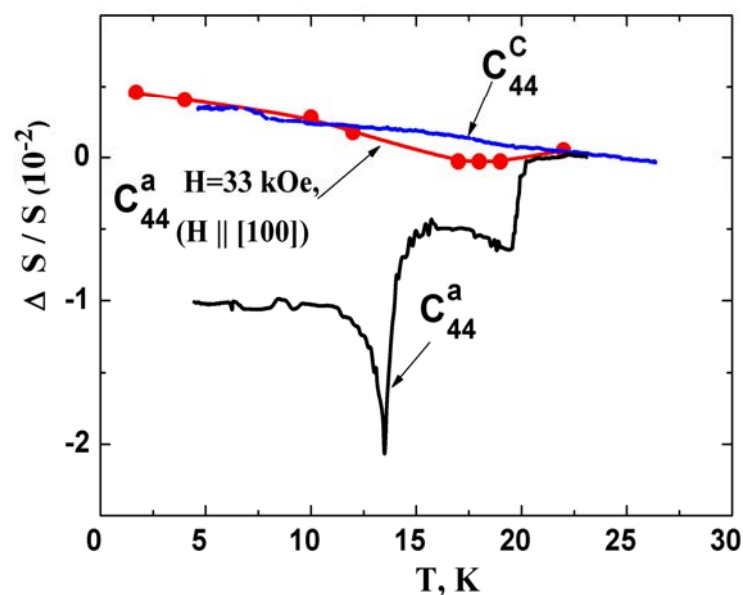


Рис. 3 Температурні залежності відносних змін швидкості C_{44} -моди сполуки $GdNi_2B_2C$ при різних напрямках хвильового вектора q та поляризації u звуку: C_{44}^a ($q \parallel [100]$, $u \parallel [001]$) та C_{44}^c ($q \parallel [001]$, $u \parallel [100]$). Підкреслимо, що в полі $H = 33$ кЕ «невзаємність» відсутня.

Основні результати розділу опубліковано в роботах [1-3, 9].

У четвертому розділі «Магнітні фазові переходи в мультифероїку $NdFe_3(BO_3)_4$ » досліджено поведінку магнітопружних характеристик феробората неодиму при температурах, що включають область магнітного впорядкування. Визначено критичні параметри (температуру та величину магнітного поля), а також характер ФП в магнітній підсистемі кристала.

У підрозділі 4.1 розглянуто особливості поведінки акустичних характеристик $NdFe_3(BO_3)_4$ при зміні температури.

У діапазоні температур 300 К – 30 К (точка магнітного впорядкування $T_N \approx 30$ К, [Е.А. Ророва et al, Eur. Phys. J. В 62, 123 (2008)]) поздовжні та поперечні акустичні моди демонструють монотонну поведінку без будь-яких особливостей, що свідчить про відсутність структурних ФП і підтверджує висновок [J.E. Namann-Borrero, et al, Phys. Rev. В 82, 094411, (2010)] про збереження кристалічної симетрії (групи R32), принаймні, в парамагнітній фазі.

Типову поведінку швидкості та поглинання звуку на прикладі акустичної моди ($q \parallel b$, $u \parallel c$) наведено на Рис. 4. Перехід у магнітовпорядкований стан проявляється у вигляді стрибкоподібного падіння швидкості та різкого сплеску поглинання при $T_N = 30,6$ К. Температурне положення аномалій поблизу T_N не змінюється при нагріванні й охолодженні, що характеризує ФП в антиферромагнітну фазу як перехід другого роду. При подальшому зниженні температури спостерігається значне зростання швидкості (зменшення поглинання), а поблизу

10 К вони практично повертаються до свого значення при T_N . Поведінка акустичних характеристик в діапазоні $10 \text{ К} < T < 25 \text{ К}$ має гістерезисний характер.

Відомо, що нижче температури Нееля в $\text{NdFe}_3(\text{BO}_3)_4$ формується колінарна антиферомагнітна структура з анізотропією типу «легка площина» (співмірна магнітна фаза). Однак, питання про те, чи зберігається вона до найнижчих температур, на момент початку досліджень даної роботи залишалось дискусійним. Так, автори статті по нерезонансному рентгенівському магнітному розсіюванню [J.E. Namann-Borrero, et al, Phys. Rev. B 82, 094411, (2010)] вважали, що колінарна структура зберігається, принаймні, до 2 К. У той же час, згідно з даними експериментів з розсіювання нейтронів [M. Janoschek, et al, Phys. Rev. B 81, 094429, (2010)] при $T_{IC} \approx 13.5 \text{ К}$ монокристал $\text{NdFe}_3(\text{BO}_3)_4$ переходить в неспівмірну (IC) магнітну фазу. Колінарна структура трансформується в довгоперіодичну антиферомагнітну спіраль.

Спостережуване в наших експериментах зростання швидкості при зниженні температури в діапазоні $10 \text{ К} < T < 20 \text{ К}$ говорить про спотворення кристалічної ґратки, найбільш імовірною причиною якого є саме ФП від колінарної до неспівмірної спіральної магнітної структури. Гістерезисний характер особливостей вказує на те, що цей ФП відбувається як перехід першого роду.

У **підрозділі 4.2** вивчалася поведінка акустичних характеристик $\text{NdFe}_3(\text{BO}_3)_4$ при зміні зовнішнього магнітного поля, орієнтованого вздовж основних кристалографічних напрямків, і фіксованому значенні температури. Поле прикладалося у двох напрямках в базисній площині: уздовж осі L^2 , ($\mathbf{H} \parallel \mathbf{a}$) і перпендикулярно до неї, ($\mathbf{H} \parallel \mathbf{b}$). Поле, орієнтоване уздовж осі L^3 ($\mathbf{H} \parallel \mathbf{c}$), не

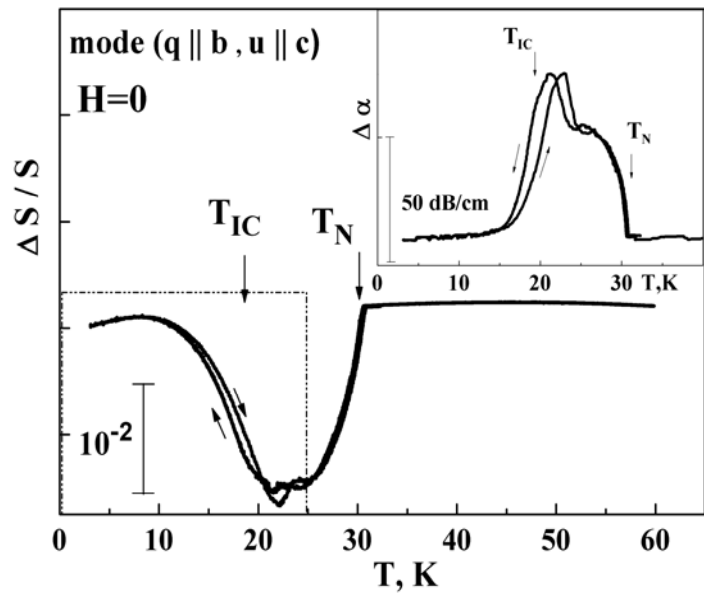


Рис. 4 Температурна залежність швидкості та поглинання (вставка) звуку поперечної моди ($\mathbf{q} \parallel \mathbf{b}$, $\mathbf{u} \parallel \mathbf{c}$) у монокристалі $\text{NdFe}_3(\text{BO}_3)_4$. Штриховою лінією позначена область існування неспівмірної (спіральної) фази.

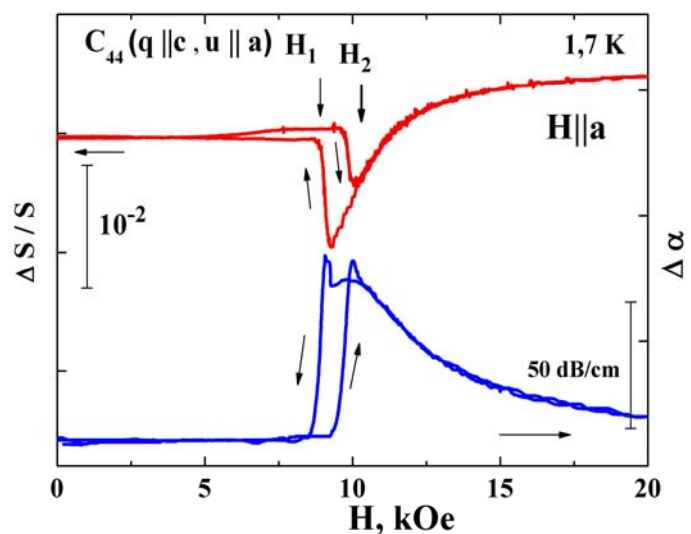


Рис. 5 Магнітопольові залежності швидкості та поглинання акустичної C_{44} -моди ($\mathbf{q} \parallel \mathbf{c}$, $\mathbf{u} \parallel \mathbf{a}$) у $\text{NdFe}_3(\text{BO}_3)_4$ при $T = 1,7 \text{ К}$ та $\mathbf{H} \parallel \mathbf{a}$.

вносило помітних змін у пружні характеристики кристала.

При $T = 1,7$ К швидкості усіх поперечних мод зазнають стрибків у полі $H_1 \sim 8$ кЕ (Рис. 5). Масштаб спостережуваних аномалій для різних мод становив 0,3 – 1%. Стрибки швидкості звуку супроводжуються ступінчастим збільшенням поглинання та інтерпретуються нами як прояв спіно-орієнтаційного переходу типу спіно-флоп.

Подібна поведінка пружних характеристик спостерігалася для обох випадків орієнтації поля в базисній площині – $H \parallel a$ та $H \parallel b$ для кожного значення температури $T < T_N$. Для $H \parallel a$ особливості при H_1 носять гістерезисний характер

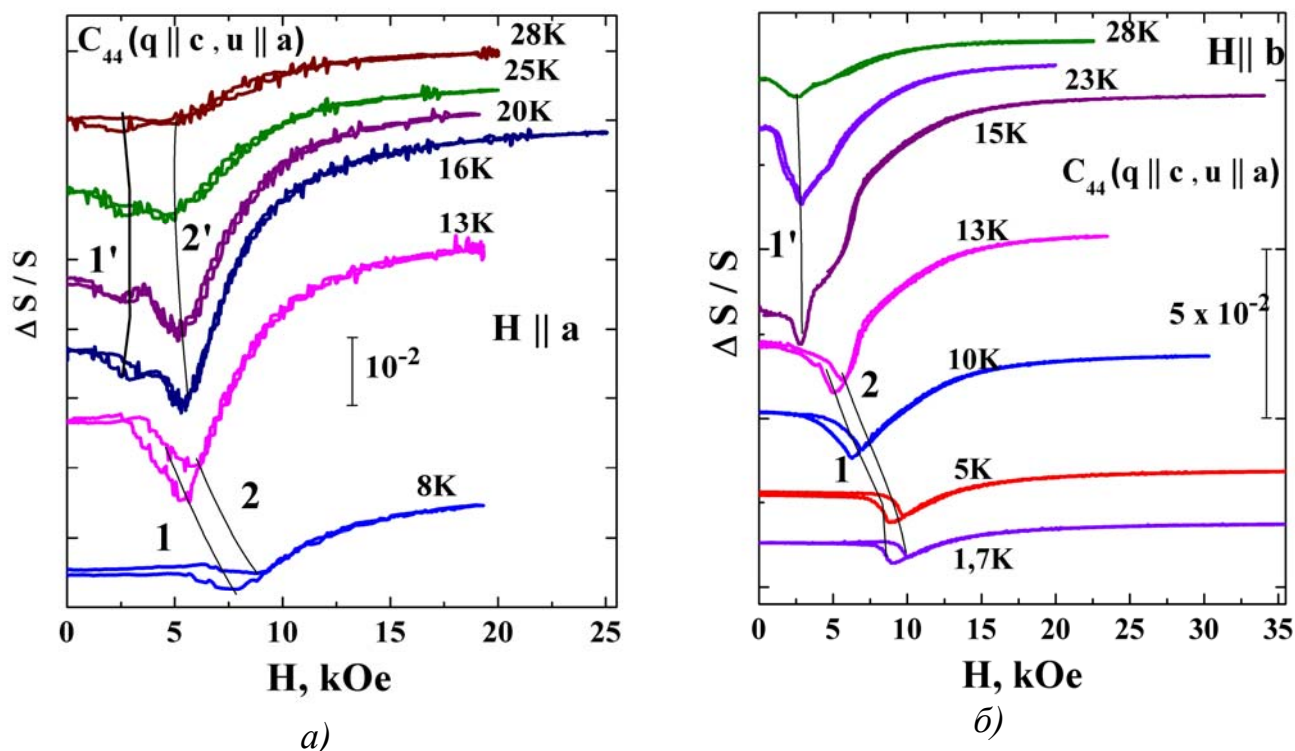


Рис. 6 Магнітопольові залежності швидкості та поглинання акустичної C_{44} -моди ($q \parallel c, u \parallel a$) у $NdFe_3(BO_3)_4$ при різних температурах в магнітному полі $H \parallel a$, (а) та $H \parallel b$, (б). Залежності зсунуті відносно одна одної по осі ординат для зручності.

практично до T_N (Рис. 6, а), а для $H \parallel b$ гістерезис зникає вище 13 К (Рис. 6, б).

За результатами акустичних досліджень **вперше** для даної сполуки були побудовані низькотемпературні фрагменти фазових $H-T$ діаграм (Рис. 7).

У колінеарній фазі (в інтервалі $18 \text{ K} \leq T \leq 30 \text{ K}$), згідно [Е.А. Ророва et al, Eur. Phys. J. В 62, 123 (2008)] в базисній площині кристала (ab) існують три осі легкого намагнічування, напрямок яких співпадає з осями симетрії другого порядку L^2 . У цій фазі виникає доменна структура, яка припускає співіснування трьох типів доменів з осями антиферомагнетизму, спрямованими уздовж L^2 . При $H \parallel a$ в одному з доменів магнітні моменти направлені уздовж осі a . У ньому відбувається ФП першого роду типу спіно-флоп (критичне поле переходу H_1 (Рис. 5)). Магнітні моменти в двох інших доменах підвертаються перпендикулярно напрямку поля. У разі $H \parallel b$ магнітні моменти в одному з доменів вже перпендикулярні напрямку поля, а в двох

інших відбувається спін-реорієнтаційний ФП (критичне поле цього переходу трохи вище значення H_1).

Таким чином анізотропія поведінки магнітопружних характеристик $\text{NdFe}_3(\text{VO}_3)_4$, що спостерігається в магнітному полі $\mathbf{H} \perp L^3$, є наслідком існування в базисній площині кристала виділених осей легкого намагнічування. Про це свідчить відмінність фазових діаграм в інтервалі $18 \text{ K} \leq T \leq 30 \text{ K}$ (Рис. 7, а, б).

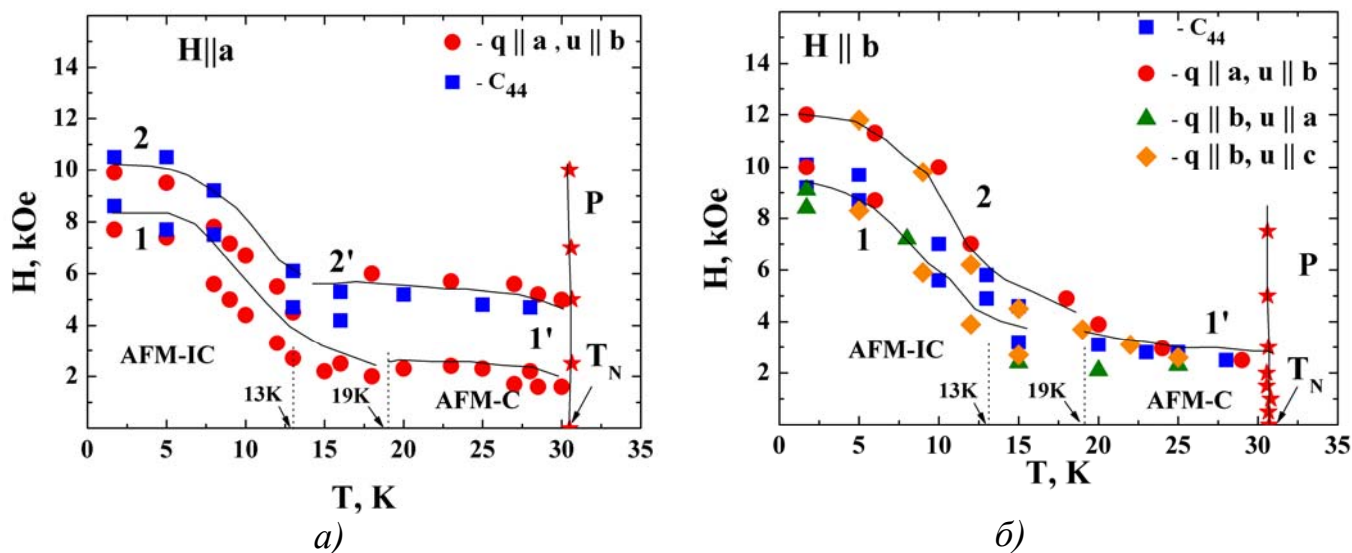


Рис. 7 Фазові $H-T$ діаграми $\text{NdFe}_3(\text{VO}_3)_4$ для $\mathbf{H} \parallel \mathbf{a}$ (а) та $\mathbf{H} \parallel \mathbf{b}$ (б). Точки на діаграмах відповідають положенню особливостей в поведінці швидкості та поглинання звуку усіх досліджуваних поперечних мод.

Нижче 13 K в кристалі, ймовірно, формується неспівмірна спіральна структура, яка являє собою довгоперіодичну антиферомагнітну спіраль, що поширюється уздовж осі c з перпендикулярними до неї магнітними моментами. У магнітному полі, прикладеному в площині обертання, може бути реалізований «spiral-plane flop» ФП (аналог спін-флопа в колінеарних антиферомагнетиках). Кут повороту магнітних векторів в спіралі невеликий, тому «spiral-plane flop» перехід не повинен бути критичним до напрямку поля в базисній площині кристалу. Це підтверджується схожістю фазових діаграм для $\mathbf{H} \parallel \mathbf{a}$ та $\mathbf{H} \parallel \mathbf{b}$ в інтервалі $1.7 \text{ K} \leq T \leq 13 \text{ K}$. В області температур $13 \text{ K} \leq T \leq 18 \text{ K}$, на нашу думку, співіснують співмірна та неспівмірна магнітні фази.

Поведінка швидкості звуку як функції температури та зовнішнього магнітного поля, що спостерігається в експерименті, була якісно описана в рамках моделі на основі феноменологічної теорії Ландау [5]. Виникнення спіральної магнітної структури пов'язується з ненульовою спонтанною електричною поляризацією.

Основні результати розділу опубліковано в роботах [5, 10, 12, 14, 16, 17, 22].

У п'ятому розділі «Низькотемпературні фазові переходи в рідкісноземельних фероборатах $\text{Nd}_{1-x}\text{Dy}_x\text{Fe}_3(\text{VO}_3)_4$ ($x = 0,25; 0,4$)» досліджені магнітопружні властивості бінарних РЗ фероборатів. До складу цих сполук одночасно входять РЗ іони, що стабілізують легковісну (ЛВ), та легкоплощинну

(ЛП) магнітні конфігурації – іони Dy і Nd відповідно. В цих кристалах очікувалася можливість реалізації спонтанного орієнтаційного ФП між ЛВ і ЛП станами.

У **Підрозділі 5.1** аналізується поведінка акустичних характеристик кристала $\text{Nd}_{0,75}\text{Dy}_{0,25}\text{Fe}_3(\text{VO}_3)$ поблизу спонтанних та індукованих магнітним полем ФП.

Було виявлено, що в $\text{Nd}_{0,75}\text{Dy}_{0,25}\text{Fe}_3(\text{VO}_3)$ спонтанна перебудова ЛП магнітної структури, яка формується в кристалі нижче T_N , в ЛВ, що існує в кристалі до найнижчих температур експерименту, відбувається в результаті двох, а не одного, як вважалося раніше [Yu.F. Popov et al, Pis'ma Zh. Eksp. Teor. Fiz. 89, 405 (2009)], ФП – через проміжну (імовірно, слабконеколінійарну фазу). Критичні температури переходів – $T_{CR1} \approx 25$ К та $T_{CR2} \approx 16$ К (Рис. 8, а).

Показано, що в низькотемпературній фазі (ЛВ) в магнітному полі $H \parallel c$ послідовно реалізуються два спін-орієнтаційних ФП, (Рис. 8, б, вставка). У проміжній фазі спостерігається тільки один ФП.

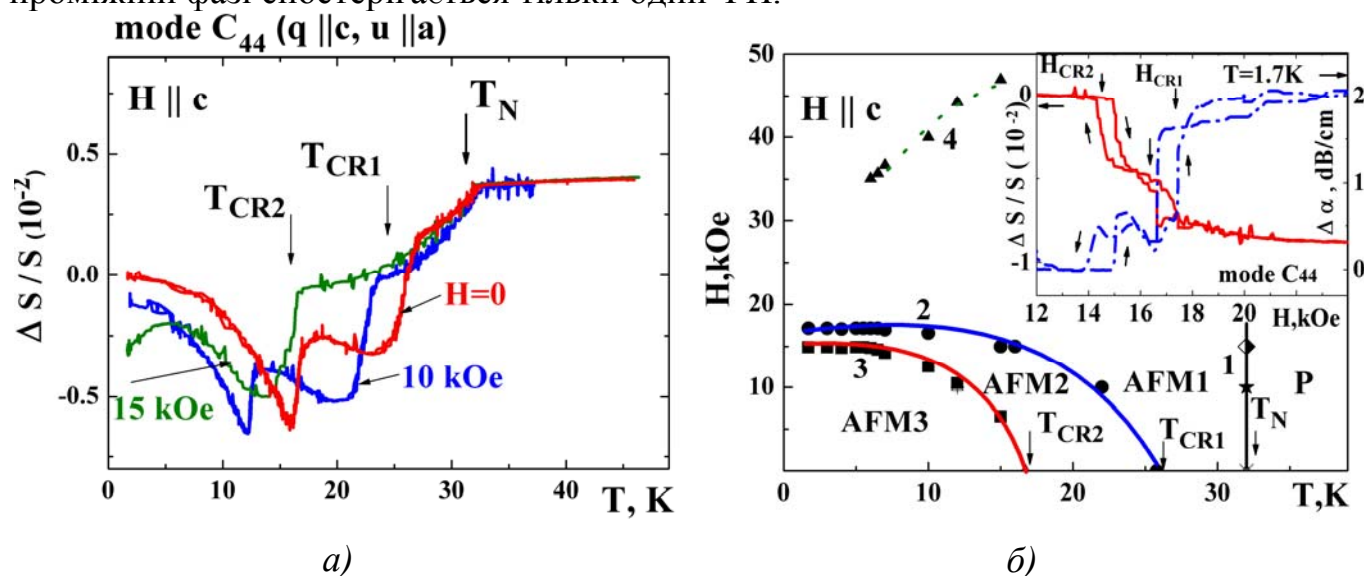


Рис. 8 Температурні залежності швидкості акустичної C_{44} -моди ($q \parallel c$, $u \parallel a$), $H \parallel c$ (а) та фазова $H-T$ діаграма сполуки $\text{Nd}_{0,75}\text{Dy}_{0,25}\text{Fe}_3(\text{VO}_3)$, $H \parallel c$ (б). На вставці – магнітопольові залежності швидкості та поглинання акустичної C_{44} -моди ($q \parallel c$, $u \parallel a$), $H \parallel c$, $T=1,7$ К.

Крім того, вивчено поведінку швидкості та поглинання звуку в магнітному полі, прикладеному в базисній площині кристала ($H \parallel a$, $H \parallel b$). Як в високотемпературній ЛП фазі, так і в проміжній фазі виявлена анізотропія поведінки пружних характеристик сполуки, що пов'язується з наявністю в базовій площині трьох осей легкого намагнічування.

За результатами проведених акустичних вимірювань **вперше** побудовані низькотемпературні фазові $H-T$ діаграми кристала $\text{Nd}_{0,75}\text{Dy}_{0,25}\text{Fe}_3(\text{VO}_3)_4$ для $H \parallel c$ (Рис. 8, б), $H \parallel a$, $H \parallel b$. Діаграми характеризуються наявністю декількох ліній ФП і, відповідно, декількох магнітних фаз. Досить складна структура $H-T$ діаграм характерна для багатопідґраткових антиферромагнетиків.

Дослідження поведінки монокристалу $\text{Nd}_{0,75}\text{Dy}_{0,25}\text{Fe}_3(\text{VO}_3)_4$ в магнітних полях, відхилених від основних кристалографічних осей, показало, що виявлені магнітні ФП реалізуються при досить великих значеннях кута відхилення зовнішнього

магнітного поля від осей c , a і b в площинах (ac) , (bc) та (ab) в кожній з магнітних фаз. Побудовано відповідні магнітні кутові фазові діаграми.

Підрозділ 5.2 присвячений дослідженню ФП в монокристалі $\text{Nd}_{0,6}\text{Dy}_{0,4}\text{Fe}_3(\text{BO}_3)_4$. На температурних залежностях швидкості та поглинання поперечних акустичних мод виявлена аномалія, характерна форма якої **вперше** дозволила визначити температуру магнітного впорядкування для даного кристала. Аналогічна поведінка акустичних характеристик спостерігалася в $\text{NdFe}_3(\text{BO}_3)_4$ (Рис. 7) і в бінарній сполуці $\text{Nd}_{0,75}\text{Dy}_{0,25}\text{Fe}_3(\text{BO}_3)_4$ (Рис. 8, а) поблизу T_N .

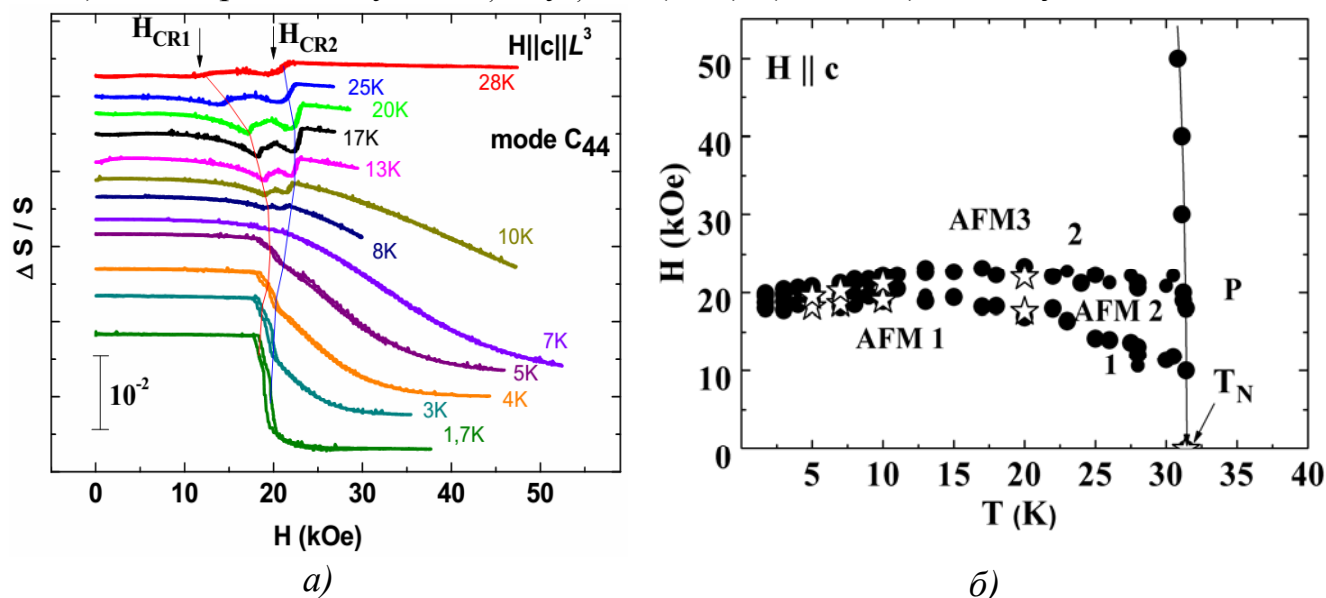


Рис. 9 Магнітопольові залежності швидкості акустичної C_{44} -моди ($q \parallel c$, $u \parallel a$), $H \parallel c$ (а) та фрагмент $H-T$ діаграми сполуки $\text{Nd}_{0,6}\text{Dy}_{0,4}\text{Fe}_3(\text{BO}_3)_4$, $H \parallel c$ (б), на діаграмі: кружки - дані акустичних вимірювань, зірочки - дані вимірювань намагніченості.

На магнітопольових залежностях швидкостей і поглинання всіх вивчених поперечних мод, в полях H_{cr1} та H_{cr2} відповідно, були виявлені дві близько розташовані особливості, супроводжувані невеликим гістерезисом (0,8 кЕ). Аномалії надійно реєструються в усьому температурному діапазоні від 1,7 К до 30 К (майже до T_N) (Рис. 9, а).

Для двох взаємно перпендикулярних напрямків поля $H \parallel a$ і $H \parallel b$, прикладеного в базисній площині, не знайдено ніяких аномалій, які могли б свідчити про фазові перетворення в магнітній підсистемі кристала. Був зроблений висновок про те, що в даній сполуці нижче точки Неєля формується магнітна структура з анізотропією типу ЛВ, яка зберігається до найнижчих температур експерименту – спонтанна переорієнтація не спостерігається. У той же час, магнітне поле, спрямоване уздовж легкої осі, призводить до послідовної реалізації двох орієнтаційних фазових переходів.

За результатами акустичних досліджень **вперше** побудована та проаналізована фазова діаграма $H-T$ кристала для $H \parallel c$ (Рис. 9, б), яка містить кілька ліній ФП, що розділяють різні магнітні фази.

Основні результати розділу опубліковано в роботах [4, 6-8, 11, 13, 15-21].

ВИСНОВКИ

1. Запропоновано й апаратно здійснено новий метод високоточних вимірювань абсолютної швидкості звуку, що дозволяє працювати з твердотільними зразками субміліметрового розміру, які сильно поглинають. Це дозволило вперше з високою точністю (похибка не перевищує 1%) визначити швидкості звуку в монокристалічних зразках борокарбідів RNi_2B_2C ($R = Y, Ho, Lu, Er, Gd$) та розрахувати компоненти тензорів модулів пружності.

2. Експериментально виявлено високу чутливість пружних модулів $GdNi_2B_2C$ до магнітних фазових перетворень, а також значну акустичну «невзаємність». Ефекти пов'язуються з істотним впливом взаємодії звукових хвиль з антиферомагнітною доменною структурою на характеристики їх поширення. Побудовано фазові $H - T$ діаграми сполуки для декількох напрямків зовнішнього магнітного поля.

3. Виявлено значні аномалії в поведінці швидкостей і поглинання акустичних мод, які супроводжують спонтанні й індуковані магнітним полем ФП в монокристалі $NdFe_3(BO_3)_4$. Визначено критичні параметри (температуру та величину магнітного поля), а також характер фазових перетворень в магнітній підсистемі кристала. Перехід в спіральну фазу класифіковано як фазовий перехід першого роду. Вперше побудовано та проаналізовано фазові $H - T$ діаграми кристалу $NdFe_3(BO_3)_4$ для випадків $H \parallel a$ і $H \parallel b$, на яких визначено межі колінеарної антиферомагнітної і неспівмірної спіральної магнітних фаз.

4. За допомогою ультразвукових досліджень виявлені та проаналізовані ФП в магнітній підсистемі монокристалів фероборатів $Nd_{1-x}Dy_xFe_3(BO_3)_4$ ($x = 0,25; 0,4$). Встановлено, що характер цих ФП залежить від напрямку магнітного поля через досить сильну магнітну анізотропію, зумовлену, насамперед, РЗ іонами.

5. Показано, що в сполуці $Nd_{0,75}Dy_{0,25}Fe_3(BO_3)_4$ спонтанна перебудова легкоплоскої магнітної структури, яка формується в кристалі нижче точки антиферомагнітного впорядкування, в легковісну, що існує до найнижчих температур експерименту, відбувається в результаті двох ФП – через проміжну магнітну фазу.

6. Вперше побудовано та проаналізовано фазові $H - T$ діаграми $Nd_{0,75}Dy_{0,25}Fe_3(BO_3)_4$ для випадків, коли магнітне поле орієнтоване уздовж основних кристалографічних напрямків ($H \parallel c$, $H \parallel a$ і $H \parallel b$). Діаграми мають складну структуру та містять кілька ліній ФП (і, відповідно, – магнітних фаз), що характерне для багатопідґраткових антиферомагнетиків. Також показано, що виявлені в сполуці реорієнтаційні ФП можуть реалізуватися при досить великих значеннях кута відхилення зовнішнього магнітного поля від осей c , a і b в площинах (ac) , (bc) і (ab) в кожній з магнітних фаз. Побудовано відповідні кутові магнітні фазові діаграми.

7. Визначено температуру Нееля для кристалу $Nd_{0,6}Dy_{0,4}Fe_3(BO_3)_4$. Показано, що в ньому відсутні спонтанні спін-реорієнтаційні переходи – система, ймовірно, знаходиться в легковісному магнітному стані. Вперше побудовано та проаналізовано фазову $H - T$ діаграму цієї сполуки для випадку $H \parallel c$. Діаграма, як і для $Nd_{0,75}Dy_{0,25}Fe_3(BO_3)_4$, характеризується наявністю декількох ліній ФП.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Масалитин Е. А. Модули упругости борокарбидов. Новый подход к технике акустических измерений. / Масалитин Е. А., Филь В. Д., **Жеков К. Р.**, Игнатова Т. В., Lee S.-I. // ФНТ – 2003. – Т. 29, №1. – С. 93–98.
2. Звягина Г. А. Магнитоупругие эффекты в $\text{GdNi}_2\text{B}_2\text{C}$ / Звягина Г. А., **Жеков К. Р.**, Филь В. Д., Sung-Ik Lee // Вісник ХНУ – 2006. – Т. 739, №9. – С. 81–91.
3. Звягина Г. А. Магнитоупругое взаимодействие и акустическая невзаимность в $\text{GdNi}_2\text{B}_2\text{C}$ / Звягина Г. А., Чупис И. Е., Филь В. Д., **Жеков К. Р.**, Авраменко Ю. А., Sung-Ik Lee // ФНТ – 2007. – Т. 33, №11. – С. 1253–1259.
4. Звягина Г. А. Низкотемпературные фазовые переходы в редкоземельном ферроборате $\text{Nd}_{0,75}\text{Dy}_{0,25}\text{Fe}_3(\text{BO}_3)_4$ / Звягина Г. А., **Жеков К. Р.**, Билич И. В., Звягин А. А., Безматерных Л. Н., Гудим И. А. // ФНТ – 2010. – Т. 36, №3. – С. 352–355.
5. Zvyagina G. A. Magnetic phase transitions in the $\text{NdFe}_3(\text{BO}_3)_4$ multiferroic / Zvyagina G. A., **Zhekov K. R.**, Bilych I. V., Zvyagin A. A., Gudim I. A., and Temerov V. L. // Low Temp. Phys. – 2011. – Т. 37, №12. – С. 1010-1022.
6. Звягина Г. А. Магнитная анизотропия в базисной плоскости редкоземельного ферробората $\text{Nd}_{0,75}\text{Dy}_{0,25}\text{Fe}_3(\text{BO}_3)_4$ / Звягина Г. А., **Жеков К. Р.**, Звягин А. А., Гудим И. А., Билич И. В. // ФНТ – 2012. – Т. 38, №5. – С. 571–575.
7. Zvyagina G. A. Magnetoelastic studies of $\text{Nd}_{0,75}\text{Dy}_{0,25}\text{Fe}_3(\text{BO}_3)_4$ in the external magnetic field: Magnetic phase transitions / Zvyagina G. A., **Zhekov K. R.**, Bilych I. V., Zvyagin A. A., Gudim I. A., Temerov V. L., Eremin E. V. // Low Temp. Phys. – 2013. – Т. 39, №11. – С. 936-946.
8. Zvyagina G. A. Magnetic field-induced phase transitions in the antiferromagnet $\text{Nd}_{0,6}\text{Dy}_{0,4}\text{Fe}_3(\text{BO}_3)_4$ / Zvyagina G. A., **Zhekov K. R.**, Bilych I. V., Zvyagin A. A., Bludov A. N., Pashchenko V. A., Gudim I. A. // Low Temp. Phys. – 2014. – Т. 40, №2. – С. 187–192.
9. Г. А. Звягина Магнитоупругие эффекты в $\text{GdNi}_2\text{B}_2\text{C}$ / Г. А. Звягина, **К. Р. Жеков**, В. Д. Филь // Сборник тезисов 7-й Международной конференции «Фізичні явища в твердих тілах», Харьков. – 2005. – С. 100.
10. Звягина Г. А. Магнитоупругие эффекты в ферроборате $\text{NdFe}_3(\text{BO}_3)_4$ / Звягина Г. А., **Жеков К. Р.**, Билич И. В., Звягин А. А., Темеров В. Л. // Book of abstracts of International Conference for Young Scientists «Low temperature physics - 2010», Kharkiv. – 2010. – С. 85.
11. **К. Р. Жеков** Низькотемпературні магнітні фазові переходи в ферроборатах $\text{Nd}_{1-x}\text{Dy}_x\text{Fe}_3(\text{BO}_3)_4$ ($x=0,1; 0,25; 0,4$) / **К. Р. Жеков**, Г. А. Звягина, А. А. Звягин, И. В. Билич, И. А. Гудим // Сборник тезисов Международной конференции студентов и молодых ученых по теоретической и экспериментальной физике «Эврика-2011», Львов. – 2011. – А6.
12. **K. R. Zhekov** Low temperature magnetic phase transition in the neodymium ferroborate / **K. R. Zhekov**, G. A. Zvyagina, I. V. Bilych, A. A. Zvyagin, I. A. Gudim, and V. L. Temerov // Book of abstracts of International Conference for Young Scientists «Low temperature physics - 2011», Kharkiv. – 2011. – С. 84.

13. **К. Р. Жеков** Магнитоупругие эффекты в мультиферроиках ряда $\text{Nd}_{1-x}\text{Dy}_x\text{Fe}_3(\text{BO}_3)_4$ ($x=0; 0,1; 0,25; 0,4$) / **К. Р. Жеков**, Г. А. Звягина, А. А. Звягин, И. В. Билыч, И. А. Гудим // Сборник тезисов IV Всеукраїнської науково-практичної конф. „Актуальні проблеми прикладної фізики” Севастополь. – 2011. – С. 142.
14. Zvyagina G. Magnetoelastic effects in the neodymium ferroborate / Zvyagina G., **Zhekov K.**, Zvyagin A., Bilych I., Gudim I., Temerov V. and Volkov N. // Moscow International Symposium on Magnetism (MISM), Moscow. – 2011. – 23PO-K-27.
15. **К. Р. Жеков** Магнитные фазовые диаграммы монокристалла $\text{Nd}_{0,75}\text{Dy}_{0,25}\text{Fe}_3(\text{BO}_3)_4$ / **К. Р. Жеков**, Г. А. Звягина, А. А. Звягин, И. В. Билыч, И. А. Гудим // Сборник тезисов 10-й Международной конференции «Фізичні явища в твердих тілах», Харьков. – 2011. – С. 28.
16. **К. Р. Жеков** Магнитоупругие эффекты в редкоземельных ферроборатах $\text{NdFe}_3(\text{BO}_3)_4$ и $\text{Nd}_{0,75}\text{Dy}_{0,25}\text{Fe}_3(\text{BO}_3)_4$ / **К. Р. Жеков**, Г. А. Звягина, А. А. Звягин, И. В. Билыч, И. А. Гудим // Сборник тезисов Международной конференции студентов и молодых ученых по теоретической и экспериментальной физике «Эврика-2012», Львов. – 2012. – D56.
17. Zvyagina G. A. Magnetoelastic effects in the vicinity of phase transitions in rare-earth ferrobates / Zvyagina G. A., **Zhekov K. R.**, Zvyagin A. A., Bilych I. V., Gudim I. A. // Сборник трудов "Critical Phenomena under Extreme Impact", Харьков. – 2012.
18. Звягина Г. А. Магнитоупругие эффекты в редкоземельном ферроборате $\text{Nd}_{0,75}\text{Dy}_{0,25}\text{Fe}_3(\text{BO}_3)_4$ / Звягина Г. А., **Жеков К. Р.**, Билыч И. В., Звягин А. А., Гудим И. А., Еремін Е. В. // Сборник трудов "36 совещание по физике низких температур", Санкт-Петербург. – 2012. – С. 96.
19. V. Bilych Magnetoelastic properties of $\text{Nd}_{0,6}\text{Dy}_{0,4}\text{Fe}_3(\text{BO}_3)_4$ / I. V. Bilych, **K. R. Zhekov**, G. A. Zvyagina, A. A. Zvyagin, I. A. Gudim, and E. V. Eremin // Book of abstracts of International Conference for Young Scientists «Low temperature physics - 2013», Kharkiv. – 2013. – С. 58.
20. І. В. Білич Магнітопружні ефекти в $\text{Nd}_{0,6}\text{Dy}_{0,4}\text{Fe}_3(\text{BO}_3)_4$ / І. В. Білич, **К. Р. Жеков**, Г. А. Звягіна, А. А. Звягін, І. А. Гудим, Є. В. Єрємін // Збірник тез Міжнародної наукової конференції студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики «Еврика-2013», Львів. – 2013. – А1.
21. Zvyagina G. A. Magnetoelastic properties of $\text{Nd}_{0,6}\text{Dy}_{0,4}\text{Fe}_3(\text{BO}_3)_4$ multiferroic / Zvyagina G. A., Bilych I. V., **Zhekov K. R.**, Zvyagin A. A., Bludov A. N., Pashchenko V. A., Gudim I. A., Eremin E. V. // Moscow International Symposium on Magnetism (MISM), Moscow. – 2014. – 30PO-M-16.
22. T. N. Gaydamak Ultrasonic in Nd and Sm ferrobates. Magnetopiezoelectric effect / T. N. Gaydamak, I. V. Bilych, G. A. Zvyagina, **K. R. Zhekov**, I. A. Gudim // Book of abstracts of VI International Conference for Young Scientists «Low temperature physics - 2015», Kharkiv – 2015. – С. 47.

АНОТАЦІЯ

Жеков К. Р. Магнітопружні ефекти в рідкісноземельних борокарбідах та фероборатах. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла. – Фізико-технічний інститут низьких температур імені Б. І. Веркіна НАН України, Харків, 2020.

В дисертаційній роботі виявлені та проаналізовані особливості пружних властивостей, а також магнітопружні ефекти, що проявляються в сполуках нікелевих борокарбідів RNi_2B_2C ($R = Y, Ho, Lu, Er, Gd$) та фероборатів $NdFe_3(BO_3)_4$, $Nd_{1-x}Dy_xFe_3(BO_3)_4$ ($x = 0,25; 0,4$) при низьких температурах, в тому числі поблизу фазових перетворень (ФП) магнітної природи.

Запропоновано і апаратно здійснено новий метод високоточних вимірювань абсолютної швидкості звуку, який дозволяє працювати зі зразками субміліметрових розмірів, що сильно поглинають.

Вперше з високою точністю (похибка не перевищує 1%) визначено швидкості звуку в монокристалах нікелевих борокарбідів (RNi_2B_2C , де $R = Y, Lu, Ho, Gd, Er$). Розраховано компоненти тензора модулів пружності.

Експериментально виявлено високу чутливість пружних модулів гадолінієвого борокарбіда до ФП магнітної природи, а також значну акустичну „невзаємність”. Ефекти пов’язуються зі значним внеском в характеристики поширення звуку його взаємодії з антиферромагнітною доменною структурою.

Виявлено суттєві аномалії пружних характеристик монокристалу рідкісноземельного фероборату $NdFe_3(BO_3)_4$ при спонтанних та індукованих магнітним полем фазових перетвореннях, що дозволило вперше побудувати фазові діаграми сполуки в площині «магнітне поле-температура». Перехід в неспівмірну спіральну фазу класифіковано як фазовий перехід першого роду.

Виявлено та проаналізовано нові ФП в магнітній підсистемі монокристалів фероборатів з двома типами РЗ іонів $Nd_{1-x}Dy_xFe_3(BO_3)_4$ ($x = 0,4; 0,25$), що реалізуються спонтанно при зміні температури та індукованих зовнішнім магнітним полем. Вперше побудовано фазові $H - T$ діаграми досліджуваних сполук для різних напрямків магнітного поля.

Ключові слова: швидкість та поглинання звуку, пружні характеристики, магнітопружні ефекти, антиферромагнетики, фазові переходи, рідкісноземельні нікелеві борокарбіди, рідкісноземельні фероборати.

АННОТАЦІЯ

Жеков К. Р. Магнитоупругие эффекты в редкоземельных борокарбидах и ферроборатах. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика твердого тела. – Физико-технический институт низких температур имени Б. И. Веркина НАН Украины, Харьков, 2020.

В диссертационной работе обнаружены и проанализированы особенности упругих свойств, а также магнитоупругие эффекты, проявляющиеся в соединениях редкоземельных (РЗ) никелевых борокарбидов RNi_2B_2C ($R = Y, Ho, Lu, Er, Gd$) и

ферроборатов $\text{NdFe}_3(\text{BO}_3)_4$ и $\text{Nd}_{1-x}\text{Dy}_x\text{Fe}_3(\text{BO}_3)_4$ ($x = 0,25; 0,4$) при низких температурах, в том числе вблизи фазовых переходов (ФП) магнитной природы.

Предложен и аппаратно осуществлён новый метод высокоточных измерений абсолютной скорости звука, позволяющий работать с сильно поглощающими образцами субмиллиметровых размеров. В рамках реализации метода разработаны: а) новая процедура одновременного определения фазы и амплитуды высокочастотных импульсных сигналов и б) электронно-управляемый фазовращатель с практически неограниченным диапазоном перестройки.

Впервые с высокой точностью (ошибка не превышает 1 %) определены скорости звука в монокристаллических образцах РЗ никелевых борокарбидов ($\text{RNi}_2\text{B}_2\text{C}$, $\text{R} = \text{Y}, \text{Lu}, \text{Ho}, \text{Gd}, \text{Er}$). Рассчитаны компоненты тензоров модулей упругости.

Экспериментально обнаружена высокая чувствительность упругих модулей гадолиниевого борокарбида ($\text{GdNi}_2\text{B}_2\text{C}$) к магнитным фазовым превращениям, а также значительная акустическая «невзаимность». Эффекты связываются с существенным влиянием взаимодействия звуковых волн с антиферромагнитной доменной структурой на характеристики их распространения.

Обнаружены значительные аномалии упругих характеристик, сопровождающие спонтанные и индуцированные магнитным полем ФП в монокристалле $\text{NdFe}_3(\text{BO}_3)_4$. Впервые построены фазовые $H-T$ диаграммы кристалла для случаев $\mathbf{H} \parallel \mathbf{a}$ и $\mathbf{H} \parallel \mathbf{b}$, на которых определены границы коллинеарной и несоразмерной магнитных фаз. Переход в несоразмерную фазу классифицирован как ФП первого рода.

Обнаружены и проанализированы новые ФП в магнитной подсистеме монокристаллов ферроборатов с двумя типами РЗ ионов $\text{Nd}_{1-x}\text{Dy}_x\text{Fe}_3(\text{BO}_3)_4$ ($x = 0,25; 0,4$). Обнаружено, что вид и характер этих превращений зависят от направления магнитного поля из-за достаточно сильной магнитной анизотропии, обусловленной, прежде всего, РЗ ионами.

Показано, что в соединении $\text{Nd}_{0,75}\text{Dy}_{0,25}\text{Fe}_3(\text{BO}_3)_4$ спонтанная перестройка легкоплоскостной магнитной структуры, которая формируется в кристалле ниже точки антиферромагнитного упорядочения, в легкоосную, существующую до самых низких температур, происходит в результате двух ФП – через промежуточную магнитную фазу.

Построены фазовые $H-T$ диаграммы $\text{Nd}_{0,75}\text{Dy}_{0,25}\text{Fe}_3(\text{BO}_3)_4$ в случаях, когда магнитное поле ориентировано вдоль основных кристаллографических направлений ($\mathbf{H} \parallel \mathbf{c}$, $\mathbf{H} \parallel \mathbf{a}$, $\mathbf{H} \parallel \mathbf{b}$). Диаграммы характеризуются наличием нескольких линий ФП, и соответственно, нескольких магнитных фаз.

Показано, что обнаруженные в $\text{Nd}_{0,75}\text{Dy}_{0,25}\text{Fe}_3(\text{BO}_3)_4$ реориентационные ФП могут реализоваться при достаточно больших значениях угла отклонения внешнего магнитного поля от осей \mathbf{c} , \mathbf{a} и \mathbf{b} , в плоскостях (\mathbf{ac}) , (\mathbf{bc}) и (\mathbf{ab}) в каждой из магнитных фаз. Построены соответствующие магнитные угловые фазовые диаграммы.

Определена температура Нееля для кристалла $\text{Nd}_{0,6}\text{Dy}_{0,4}\text{Fe}_3(\text{BO}_3)_4$. Показано, что в нем отсутствуют спонтанные спин-переориентационные ФП – система,

вероятно, находится в «легкоосном» магнитном состоянии. Впервые построена и проанализирована фазовая $H - T$ диаграмма этого соединения для случая $H \parallel c$.

Ключевые слова: скорость и поглощение звука, упругие характеристики, магнитоупругие эффекты, антиферромагнетики, фазовые переходы, редкоземельные никелевые борокарбиды, редкоземельные ферробораты.

ABSTRACT

Zhekov K. R. Magneto-elastic effects in rare-earth borocarbides and ferroborates. – Manuscript.

Thesis for a candidate's degree in physics and mathematics by speciality 01.04.07 – solid state physics. – B. I. Verkin Institute for Low Temperature Physics and Engineering, NAS of Ukraine, Kharkiv, 2020.

In the thesis features of elastic properties as well as the magnetoelastic effects that are manifested in compounds of nickel borocarbides RNi_2B_2C ($R = Y, Ho, Lu, Er, Gd$) and $NdFe_3(BO_3)_4$ and $Nd_{1-x}Dy_xFe_3(BO_3)_4$ ($x=0.25; 0.4$) ferroborates at low temperatures, have been discovered and analyzed.

The new method of high-precision measurements of absolute sound velocity has been proposed and hardware implemented, which allows working with samples of sub-millimeter sizes which are highly absorbing.

For the first time, with the accuracy of above 1%, the sound velocities in single crystals of nickel borocarbides RNi_2B_2C , ($R = Y, Lu, Ho, Gd, Er$) have been measured with an accuracy of more than 1 %. The components of the tensor modulus of elasticity have been calculated.

The high sensitivity of the gadolinium borocarbide elastic modules to phase transformations of magnetic nature, as well as significant acoustic "non-reciprocity" have been experimentally detected. The effects are associated with the significant contribution of its interaction with the antiferromagnetic domain structure to the characteristics of the propagation of the sound.

Significant anomalies of the elastic characteristics of a single-crystal of rare-earth ferroborate $NdFe_3(BO_3)_4$ have been found out for spontaneous and magnetic field -induced phase transitions. It allowed constructing phase diagrams of the compound in the "magnetic field-temperature" plane for the first time. The transition to an incommensurate spiral phase has been classified as a first-order phase transition.

New phase transitions in the magnetic subsystem of ferroborates with two types of rare-earth ions $Nd_{1-x}Dy_xFe_3(BO_3)_4$ ($x=0.4; 0.25$), which are realized spontaneously at temperature changes and induced by an external magnetic field, have been discovered and analyzed. For the first time $H - T$ phase diagrams of the investigated compounds for different directions of the external magnetic field have been constructed.

Keywords: sound velocity and absorption, elastic characteristics, magneto-elastic effects, antiferromagnets, phase transitions, rare earth nickel borocarbides, rare earth ferroborates.

Формат 60x84/16. Ум. друк. арк. 0.9. Тир. 100 прим. Зам. № 584-19.
Підписано до друку 16.12.2019. Папір офсетний.

Надруковано з макету замовника у ФОП Бровін О.В.
61022, м. Харків, вул. Трінклера, 2, корп.1, к.19. Т. (057) 758-01-08, (066) 822-71-30
Свідоцтво про внесення суб'єкта до Державного реєстру
видавців та виготовників видавничої продукції серія ДК 3587 від 23.09.09 р.

СТИЛЬ®
ИЗДАТ
ТИПОГРАФІЯ
www.stil-izdat.com