

ВІДГУК
офіційного опонента

на дисертаційну роботу Жекова Костянтина Ростиславовича
«МАГНІТОПРУЖНІ ЕФЕКТИ В РІДКІСНОЗЕМЕЛЬНИХ БОРОКАРБІДАХ
ТА ФЕРОБОРАТАХ»,

подану до захисту на здобуття
наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук
за спеціальністю 01.04.07 – «фізики твердого тіла»

Актуальність теми дисертації. В дисертаційній роботі К.Р. Жекова розглянута проблема взаємозв'язку фононної та магнітної (електронної) підсистем в кристалах з кількома типами впорядкування. Останнім часом такі сполуки викликають підвищений інтерес, який стимулюється пошуком нових багатофункціональних матеріалів із заданими або керованими фізичними властивостями. Серед таких об'єктів – дві групи сполук на основі бору, що містять переходні d - та f -елементи. Це – рідкісноземельні (РЗ) нікелеві борокарбіди RNi_2B_2C і РЗ фероборати $RFe_3(BO_3)_4$ ($R = Y$, $Рг - Yb$). Унікальність кристалів сімейства РЗ борокарбідів полягає в тому, що більшість з них є магнітними надпровідниками. РЗ фероборати належать до класу мультифероїків, в яких співіснують сегнетоелектричний, магнітний та/або сегнетоеластичний типи впорядкування. Природна задача при дослідженні таких матеріалів пов'язана з вивченням взаємодії між магнітною, електричною та пружною підсистемами із встановленням механізмів керування їх властивостями та з'ясуванням впливу зовнішніх факторів (наприклад, – температури, магнітного або електричного полів і т.д.) на стан кожної з підсистем кристалів. Дисертаційна робота К. Р. Жекова «Магнітопружні ефекти в рідкісноземельних борокарбідах та фероборатах» присвячена вирішенню вищезгаданих завдань з галузі фізики твердого тіла на прикладі експериментального дослідження багатофункціональних сполук, до яких належать сімейства РЗ борокарбідів та фероборатів. Це дослідження є, безумовно, актуальним, як з фундаментальної, так і з прикладної точки зору. Результати, що представлені в дисертаційній роботі, є важливими для створення адекватних уявлень про магнітопружні ефекти, бо вони можуть допомогти спрогнозувати особливості зміни фазового стану в магнітовпорядкованих кристалах з подібними

функціональними властивостями. Актуальність роботи також підтверджує перелік держбюджетних тем, що виконувалися у Фізико-технічному інституті низьких температур ім. Б. І. Вєркіна НАН України, в рамках яких здобувачем були отримані основні наукові результати.

Структура дисертації є досить традиційною. 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 8 статтях, які опубліковано у провідних фахових виданнях, та в 14 тезах доповідей у збірниках праць міжнародних і вітчизняних конференцій.

Перший розділ присвячено стислому огляду відомостей стосовно структури та деяких фізичних, в першу чергу магнітних, властивостей рідкісноземельних нікелевих борокарбідів та рідкісноземельних фероборатів. Розділ завершується постановкою завдань дисертаційної роботи.

Розділи з другого по п'ятий містять основні оригінальні результати автора.

Другий розділ присвячено опису експериментальної установки, яка складається з апаратної та кріогенної частин. Варто підкреслити, що використана в роботі експериментальна методика вимірювань швидкості та поглинання звуку, у розробці якої автор брав безпосередню участь, є унікальною за своїми метрологічними характеристиками і дозволяє працювати з сильно поглинаючими зразками субміліметрового розміру.

Третій розділ містить результати низькотемпературних досліджень пружних та магнітопружних характеристик рідкісноземельних борокарбідів RNi_2B_2C ($R = Y, Lu, Ho, Gd, Er$). Використання описаної в розділі 2 «ноніусної» методики дозволило визначити з похибкою менше 1% абсолютні значення швидкостей звуку в ряді монокристалів РЗ борокарбідів. На підставі цих даних були отримані значення компонент тензора модулів пружності, температур Дебая і модуля об'ємного стиснення. Така важлива довідкова інформація в літературі була відсутня, головним чином, тому, що ні кому не вдавалося з високою точністю виміряти швидкості звуку на існуючих на той момент в світі монокристалах РЗ борокарбідів, які мали

міліметрові і, навіть, субміліметрові розміри. Друга частина третього розділу містить дослідження особливостей низькотемпературної поведінки швидкості та поглинання звуку в монокристалі $GdNi_2B_2C$ поблизу магнітних фазових переходів. Це дозволило побудувати фазові H - T діаграми сполуки для декількох напрямків зовнішнього магнітного поля.

У **четвертому розділі** досліджено вплив температури та зовнішнього магнітного поля на умови розповсюдження звуку в монокристалі фероборату $NdFe_3(BO_3)_4$, особливо низче точки магнітного впорядкування. Виявилося, що фазові перетворення суто магнітної природи (спонтанні та індуковані полем) проявляються у вигляді яскравих аномалій у поведінці скорості та поглинання звуку, що є наслідком суттєвого зв'язку магнітної та пружної підсистем кристалу. На основі аналізу експериментальних даних вперше побудовано магнітні фазові діаграми сполуки.

У **п'ятому розділі** приведено результати аналогічних досліджень магнітопружних властивостей бінарних рідкісноземельних фероборатів $Nd_{1-x}Dy_xFe_3(BO_3)_4$ з концентраціями $x = 0.25, 0.4$. Найбільш важливим результатом є встановлення того факту, що в сполуці $Nd_{0.75}Dy_{0.25}Fe_3(BO_3)_4$ перебудова магнітної структури під впливом температури та магнітного поля здійснюється шляхом двох фазових перетворень. Показано також, що в сполуці з високим (40%) вмістом диспрозію спонтанна (при зміні температури) спінова переорієнтація не відбувається. Хоча зовнішнє магнітне поле, аналогічно $Nd_{0.75}Dy_{0.25}Fe_3(BO_3)_4$, індукує послідовність з двох фазових переходів. Вперше побудовано та проаналізовано фазові H - T діаграми досліджуваних сполук для різних напрямків магнітного поля.

У розділі **Висновки** сформульовані основні результати роботи.

Результати, що одержані автором, є **актуальними та, безумовно, новими**. Як найбільш цікаві, вважаю доцільним виділити наступні:

- Вперше** запропоновано й апаратно здійснено новий метод високоточних вимірювань абсолютної швидкості звуку. Використання цього нового методу дозволило з високою точністю, похибка якого не перевищує 1%, вимірюти

швидкість звуку в монокристалічних зразках субміліметрового розміру, які сильно поглинають, та розрахувати компоненти тензора модулів пружності.

2. **Вперше** отримано дані щодо пружних констант ряду кристалів рідкісноземельних нікелевих борокарбідів.
3. **Вперше** виявлено висока чутливість пружних модулів сполук $\text{GdNi}_2\text{B}_2\text{C}$, $\text{NdFe}_3(\text{BO}_3)_4$ та $\text{Nd}_{1-x}\text{Dy}_x\text{Fe}_3(\text{BO}_3)_4$ ($x = 0.25, 0.4$) до фазових перетворень магнітної природи. Встановлено, що досліджувані сполуки характеризуються сильним зв'язком між магнітною (електронною) та фононною підсистемами, а магнітопружна взаємодія вносить суттєвий вклад в енергію кристалів.
4. **Вперше** побудовані і проаналізовані магнітні фазові діаграми монокристалічних зразків досліджених сполук на основі рідкісноземельних борокарбідів і фероборатів.

Достовірність результатів, висновків, положень забезпечується високим рівнем експериментальної техніки і підтверджується гарною відтворюваністю результатів. Результати роботи, зокрема структура фазових діаграм, були підтвержені в проведених пізніше експериментах інших авторів. Усі висновки роботи логічно випливають із матеріалів, які викладено в дисертації та публікаціях у провідних наукових журналах за темою дисертації. Одержані результати та їхня інтерпретація неодноразово обговорювалися на міжнародних конференціях та наукових семінарах.

Наукове та практичне значення отриманих результатів. Основні результати дисертаційної роботи отримані вперше. Вони можуть бути використані при аналізі фазових станів та причин їх зміни, що відбуваються внаслідок існуючої взаємодії між фононною та електронною (магнітною) підсистемами в кристалах рідкісноземельних борокарбідів і фероборатів. Результати дисертаційної роботи доцільно використовувати стосовно теоретичного аналізу механізмів магнітопружної взаємодії в сполуках на основі бору, що містять магнітні іони d - і f -елементів. Зроблені висновки є важливими при прогнозуванні деяких фізичних характеристик не тільки кристалів дослідженого складу, але й споріднених сполук. Результати роботи розширяють і поглинюють уявлення про об'єкти, які дуже

важливі, як для розвитку фізики твердого тіла, так і для створення нових функціональних матеріалів з потрібними фізичними властивостями. Запропонована в роботі «ноніусна» методика високоточного визначення абсолютних значень швидкостей звуку може бути використана для тестування нових, перспективних для застосування в широкому інтервалі температур, твердотільних зразків міліметрового та субміліметрового розміру.

Повнота викладення основних наукових і практичних результатів в опублікованих роботах. Основні результати дисертаційної роботи К.Р. Жекова було опубліковано у повному обсязі в 8 статтях у провідних фахових виданнях України та за кордоном. Сім з восьми статей опубліковано в журналах з імпакт-фактором, що входять до міжнародних наукометричних баз. Результати досліджень доповідалися й обговорювалися на 14 міжнародних наукових конференціях та були опубліковані в збірниках тез цих конференцій.

Зауваження. При загальній позитивній оцінці роботи слід відмітити, що дисертація не позбавлена певних недоліків. Наведу декілька з них:

1. В другому розділі роботи представлено експериментально визначені абсолютні швидкості звуку монокристалів рідкісноземельних борокарбідів та розраховані пружні константи (компоненти тензору модулів пружності, температури Дебая та модулі об'ємного стиснення). Але для кристалів рідкісноземельних фероборатів така інформація в дисертації відсутня. Було б логічним провести ці дослідження.

2. На стор. 61 формула $\frac{\delta v}{v} = \frac{30}{\Phi_0} \approx 2 \cdot 10^{-9} \frac{v}{L}$ представлена в невдалому вигляді, оскільки ліва частина формулі безрозмірна, а права має розмірність.

3. Чому в роботі, в основному, був проведений аналіз поведінки поперечних акустичних мод, а аналіз повздовжніх акустичних мод не проводився?

В тексті дисертації є також незначні друкарські помилки.

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

Загальний висновок. Дисертаційна робота К. Р. Жекова є завершеною кваліфікаційною 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. На підставі виконаних автором експериментальних досліджень розв'язане наукове завдання з виявлення особливостей пружних і магнітопружніх властивостей, а також встановлені закономірності взаємопливу між фононною та магнітною підсистемами в кристалах рідкісноземельних борокарбідів і фероборатів при низьких температурах поблизу магнітних фазових перетворень. Дисертація написана хорошою науковою мовою. Автореферат повною мірою відображає основний зміст, структуру і висновки дисертації. Тема дисертаційної роботи, її зміст і отримані наукові результати відповідають паспорту спеціальності 01.04.07 – фізика твердого тіла та мають істотне значення для даної галузі науки.

За актуальністю, новизною, науковим рівнем, об'ємом виконаних досліджень дисертаційна робота К. Р. Жекова «Магнітопружні ефекти в рідкісноземельних борокарбідах та фероборатах» повністю відповідає вимогам п. 9, 11 та 12 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. № 567, а її автор Жеков Константин Ростиславович заслуговує на присудження наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла.

Офіційний опонент:

провідний науковий співробітник відділу фазових перетворень
Донецького фізико-технічного інституту ім. О.О. Галкіна НАН України
доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник

О. В. Пащенко

Підпис Олексія Валентиновича Пащенка засвідчує.

Вчений секретар
Донецького фізико-технічного інституту
ім. О.О. Галкіна НАН України
кандидат технічних наук



В.Ю. Дмитренко