

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Блудова Олексія Миколайовича

«Особливості резонансних властивостей та магнітних фазових перетворень в празеодимовому феробораті та рідкісноземельних хромоборатах»,

подану на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.11 – «магнетизм».

Актуальність теми. Дисертаційна робота присвячена експериментальному виявленню особливостей магнітних властивостей, антиферромагнітного резонансу і магнітних фазових переходів в монокристалі празеодимового фероборату та кристалів хромоборатів з лантаном, гадолінієм, тербієм та диспрозієм. Вказані сполуки належать до численного сімейства рідкісноземельних боратів в яких кисневі октаедри магнітних (Fe^{3+} або Cr^{3+}) чи немагнітних (Al^{3+} або Ga^{3+}) катіонів формують ланцюжки, які поєднуються у тривимірну кристалічну структуру за допомогою трикутних груп VO_3 та кисневих призм навколо рідкісноземельних іонів. Найбільш поширена структурна модифікація для представників цього сімейства має просторову групу $R32$ без центра симетрії, що дозволяє низку ефектів серед яких: п'єзоелектричний, квадратичний магнітоелектричний, деякі нелінійнооптичні ефекти. Рідкісноземельні алюмоборати демонструють рекордні величини електричної поляризації в магнітному полі (до 3600 мкКл/м^2 при 7 Тл), мають хороші оптичні властивості та вже використовуються в якості матеріалів для лазерної техніки.

Важливо, що магнітними властивостями цих сполук можна керувати завдяки розбавленню підсистеми магнітних іонів немагнітними іонами або заміщуючи іншими магнітними, що дуже важливо з точки зору прикладного застосування цих сполук. Ці сполуки є мультифероїками другого типу, що також значно підсилює інтерес до них з боку дослідників.

Дотепер недостатньо вивченими є резонансні властивості деяких рідкісноземельних фероборатів та відсутня інформація щодо магнітних та резонансних властивостей більшості рідкісноземельних хромоборатів. Вивчення магнітних та резонансних властивостей вказаних сполук безумовно є **актуальною** задачею фізики магнетизму. Актуальність роботи також підтверджується переліком відомчих тем, які виконувались в Фізико-технічному інституті низьких температур імені Б.І. Веркіна НАН України, та в рамках яких дисертантом було отримано основні наукові результати.

Дисертація складається з анотації, вступу, шести розділів, серед яких чотири є оригінальними, висновків, списку літератури та шести додатків. Основні наукові результати, що містяться у дисертації, опубліковані в 6 статтях в провідних фахових виданнях та 8 тезах доповідей у збірках праць міжнародних та вітчизняних наукових конференцій.

В **першому розділі** викладено огляд літератури за темою дисертації з акцентом на магнітні, резонансні та магнітоелектричні властивості рідкісноземельних фероборатів та хромоборатів. Також розглянуті особливості кристалічних структур, що характерні для цього сімейства. Кількість опрацьованої автором літератури вказує на ґрунтовний підхід до проблеми та достатній рівень знань в обраній області.

Другий розділ дисертації присвячений опису експериментальних методик та обладнання, що використовувалося при виконанні роботи. Скорочено викладено інформацію щодо методики отримання зразків та результатів їх структурної атестації. Зразки $\text{LaCr}_3(\text{BO}_3)_4$ та $\text{DyCr}_3(\text{BO}_3)_4$, на відміну від інших, виявились двофазними, що в подальшому враховувалось при аналізі отриманих результатів.

Розділ номер три присвячений вивченню антиферромагнітного резонансу в монокристалі празеодимового фероборату в широкому діапазоні магнітних полів та частот НВЧ випромінювання при гелієвій температурі. Встановлено, що експериментальні дані добре описуються в рамках теорії для двонідграткового антиферромагнетика з анізотропією типу «легка вісь» у

межах припущення, що при спін-переорієнтаційному фазовому переході стрибком змінюється ефективне поле анізотропії кристала. Резонансним методом встановлено, що спін-переорієнтаційний фазовий перехід в монокристалі $\text{PrFe}_3(\text{BO}_3)_4$, індукований зовнішнім магнітним полем вздовж легкої осі магнітної анізотропії, є переходом першого роду. Визначено величину ефективного поля магнітної анізотропії та оцінено внесок в неї з боку празеодимової підсистеми кристалу.

В **четвертому розділі** описуються результати експериментальних досліджень магнітних та теплових властивостей двофазного кристала лантанового хромоборату. Аналіз експериментальних даних дав змогу визначити ефективні константи обмінної анізотропії в ланцюжках та між ланцюжками іонів Cr^{3+} . Для кожної структурної модифікації визначено температуру Нееля та знайдено спін-переорієнтаційний перехід для випадку коли магнітне поле спрямовано перпендикулярно ланцюжкам.

П'ятий розділ присвячено багатобічному дослідженню монокристала гадолінієвого хромоборату. В результаті проведеного аналізу вдалося грубо оцінити величини констант внутрішньо- та міжланцюжкової Cr-Cr обмінних взаємодій та визначити знак та порядок величини Cr-Gd обмінної взаємодії. Знайдено спін-переорієнтаційний фазовий перехід, що відбувається в упорядкованій фазі кристала. Поле переходу не залежить від температури та дуже слабо залежить від орієнтації зовнішнього магнітного поля. Результати резонансних досліджень вказують на те, що кристал є антиферомагнетиком зі слабкою анізотропією типу «легка площина». Виявлена електрична поляризація, що з'являється в кристалі в зовнішньому магнітному полі, яка сильно пов'язана з магнітними властивостями гадолінієвого хромоборату. Побудована магнітна $H-T$ фазова діаграма.

В **шостому розділі** обговорюються результати досліджень кристалів хромоборатів з сильноанізотропними рідкісноземельними іонами Tb^{3+} та Dy^{3+} . Для монокристала тербієвого хромоборату визначено температуру Нееля, знайдено спонтанний фазовий перехід із антиферомагнітного стану з

анізотропією типу «легка площина» в антиферомагнітний стан з анізотропією типу «легка вісь». Визначено величини константи обмінної взаємодії в хромовій підсистемі та знак взаємодії між підсистемами. Виявлено, що у випадку $H||c$ електрична поляризація в кристалі з'являється тільки після переходу у фазу з анізотропією типу «легка площина». Побудована магнітна фазова діаграма для орієнтації зовнішнього магнітного поля вздовж осі c кристала. Магнітні властивості кожної з фаз двофазного кристалу з диспрозієм якісно подібні до властивостей тербієвого хромоборату.

В розділі **Висновки** сформульовані основні результати дисертаційної роботи.

Найбільш важливі результати отримані в дисертаційній роботі, на мій погляд, такі:

1. Вперше виявлено, що спінове впорядкування в кристалах рідкісноземельних хромоборатів $RCr_3(BO_3)_4$ з лантаном, гадолінієм, тербієм та диспрозієм є антиферомагнітним та визначено температури їх переходу до антиферомагнітного стану. Показано, що хромову підсистему цих кристалів можна представити як систему взаємодіючих між собою ланцюжків спінів $S = 3/2$ із десятиразовим співвідношенням величин констант антиферомагнітної внутрішньо-ланцюжкової та феромагнітної міжланцюжкової обмінної взаємодії, а обмінна взаємодія між хромовою та рідкісноземельною підсистемами має феромагнітний характер.

2. Вперше виявлено, що кристал $GdCr_3(BO_3)_4$ в магнітоупорядкованому стані є антиферомагнетиком зі слабкою анізотропією типу «легка площина». Знайдено спін-переорієнтаційний фазовий перехід, індукований магнітним полем, який існує для будь-якого напрямку магнітного поля відносно осей кристалу. Побудовано магнітну фазову діаграму кристала.

3. Вперше показано, що в кристалах $TbCr_3(BO_3)_4$ і $DyCr_3(BO_3)_4$ при низьких температурах реалізується антиферомагнітний стан з магнітною анізотропією типу «легка вісь», а при зростанні температури відбувається спонтанний спін-переорієнтаційний фазовий перехід в антиферомагнітну

фазу з анізотропією типу «легка площина». Для кристалу $\text{TbCr}_3(\text{VO}_3)_4$ побудовано магнітну $H-T$ фазову діаграму при орієнтації магнітного поля вздовж осі анізотропії.

4. Вперше в рідкісноземельних хромоборатах $\text{GdCr}_3(\text{VO}_3)_4$ та $\text{TbCr}_3(\text{VO}_3)_4$ виявлено індуковану магнітним полем електричну поляризацію.

Обґрунтованість та достовірність висновків, сформульованих в дисертації забезпечується тим, що експериментальні результати, отримані за допомогою низки добре апробованих і надійних експериментальних методів, які доповнюють один одного, добре відтворюються, а їх аналіз проводився за допомогою добре відомих теоретичних моделей.

Зауваження та запитання щодо дисертаційної роботи:

1. В першому розділі лише мимохідь згадуються відомі з літератури дані щодо питомої теплоємності рідкісноземельних феро- та хромоборатів. Між тим в оригінальних розділах 4–6 аналіз теплоємності використовується не тільки для отримання інформації щодо фазових перетворень, а і для оцінки константи обмінної взаємодії в ланцюжках хрому.
2. Залишилась нез'ясованою природа зміни ефективної анізотропії в празеодімовому феробораті.
3. На мій погляд також недостатньо даних по вимірюванню магнітного резонансу в деяких рідкісноземельних хромоборатах, наприклад, в тербієвому.

Однак наведені недоліки не знижують цінності одержаних в дисертаційній роботі результатів, не ставлять під сумнів достовірність і обґрунтованість висновків, які зроблені в роботі, та не впливають визначальним чином на загальну позитивну оцінку дисертації Блудова О.М.

Загальні висновки. Дисертаційна робота Блудова О.М. є завершеною кваліфікаційною науковою працею, яка виконана на високому науковому

рівні. В ній чітко сформульована постановка задачі, розкриті методи її розв'язання і отримані нові наукові результати.

Автореферат у повному обсязі передає зміст дисертації. Тема дисертаційної роботи її зміст та отримані результати у повній мірі відповідають паспорту спеціальності 01.04.11 – магнетизм.

Дисертаційна робота О.М. Блудова «Особливості резонансних властивостей та магнітних фазових перетворень в празеодимовому феробораті та рідкісноземельних хромоборатах» цілком відповідає вимогам п. 9, 11 та 12 «Порядку присудження наукових ступенів», а її автор, Блудов Олексій Миколайович, заслуговує на присудження наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.11 – магнетизм

Офіційний опонент:

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

Ю.Г. Пашкевич

Підпис Юрія Георгійовича Пашкевича засвідчую

Вчений секретар

Донецького фізико-технічного інституту імені О.О. Галкіна
Національної академії наук України (м. Київ)
кандидат технічних наук



В.Ю. Дмитренко