

## 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.** Сучасний технологічний прогрес стимулює пошук нових функціональних матеріалів, які б мали бажані властивості. Сполуки на основі перехідних металів демонструють низку унікальних властивостей (колосальний магнітоопір, високотемпературна надпровідність, магнітокалоричний ефект, мультифероїчні властивості). У системах з декількома магнітними підсистемами ( $3d$  та  $4f$ ) за рахунок взаємодії між підсистемами можуть спостерігатися незвичні фізичні властивості. Перспективним класом змішаних  $3d-4f$  систем є рідкісноземельні феро- та хромоборати з загальною хімічною формулою  $RM_3(BO_3)_4$  ( $R$  = рідкісноземельний метал;  $M = Cr, Fe$ ). Ці сполуки демонструють велику різноманітність магнітних властивостей і ефектів при різних комбінаціях  $3d$  та  $4f$  елементів у їх складі. Вони належать до мультифероїків другого типу, в яких магнітна та зарядова підсистеми є сильно зв'язаними. Таким чином важливим та **актуальним** є дослідження особливостей магнітних властивостей вказаних рідкісноземельних боратів.

Більшість експериментальних досліджень, що викладені в дисертаційній роботі, було проведено у відділі магнетизму Фізико-технічного інституту низьких температур імені Б.І. Веркіна НАН України в рамках наступних відомчих тем фундаментальних досліджень: «Низькотемпературні магнітні та оптичні властивості фероїків» (номер державної реєстрації 0112U002636, термін виконання 2012–2016 рр.), «Фізичні властивості магнетоконцентрованих сполук і штучних структур з конкуруючими взаємодіями» (номер державної реєстрації 0117U002288, термін виконання 2017–2021 рр.), «Новітні магнітні системи з сильним зв'язком між електричними, магнітними і структурними властивостями та шляхи керування їх функціональними можливостями» (номер державної реєстрації 0118U100342, термін виконання 2018–2019 рр.).

Структура дисертації є доволі стандартною та складається з анотації, вступу, шести розділів, висновків, бібліографічного списку та шести додатків. Текст дисертації міститься на 159 сторінках та має у своєму складі 55 рисунків та 10 таблиць. Дисертація написана логічною і зрозумілою науковою мовою та оформлена належним чином.

У **Вступі** дисертант обґрунтовує актуальність теми досліджень, формулює мету і задачі роботи, новизну отриманих результатів, відзначає їх наукову та практичну цінність. **Перший** розділ присвячено огляду наукової літератури за темою дисертаційної роботи. У ньому висвітлена інформація щодо особливостей структури та фізичних властивостей рідкісноземельних феро- та хромоборатів. У **Другому** розділі дисертації наведено опис експериментальних методик, що використовувались в роботі, надано інформацію щодо процедури синтезу зразків та результати їх рентгеноструктурних досліджень. Розділи з третього по шостий є оригінальними. У **Третньому** розділі викладено результати досліджень антиферомагнітного резонансу в монокристалі празеодимового фероборату та проведено їх аналіз в рамках моделі для легковісного двопідграткового антиферомагнетика. У **Четвертому, П'ятому та Шостому** розділах послідовно розглядаються результати досліджень рідкісноземельних хромоборатів з немагнітним (лантан), магнітним ізотропним (гадоліній) та магнітним сильноанізотропним (тербій, диспрозій) рідкісноземельними іонами. Для вказаних рідкісноземельних хромоборатів визначено температури Нееля, константи внутрішньо- та міжланцюжкової обмінних взаємодій в хромовій підсистемі, оцінено знак та порядок величини обмінної взаємодії між магнітними підсистемами (хромовою та рідкісноземельною). Для гадолінієвого та тербієвого хромоборатів експериментально спостережено індуковану магнітним полем електричну поляризацію, побудовано магнітні фазові діаграми. Для кристалів тербієвого та диспрозієвого хромоборатів знайдено спонтанний фазовий перехід із антиферомагнітного стану з анізотропією типу «легка площина» в антиферомагнітний стан з анізотропією типу «легка вісь».

Результати, отримані в дисертаційній роботі, є **новими**. Як найбільш цікаві, хотілося б виділити такі:

- Вперше показано, що хромову підсистему рідкісноземельних хромоборатів можна представити як систему взаємодіючих ланцюжків спінів  $S = 3/2$  із десятикратним співвідношенням величин констант антиферомагнітної внутрішньоланцюжкової та феромагнітної міжланцюжкової обмінних взаємодій, а обмінна взаємодія між хромовою та рідкісноземельною підсистемами має феромагнітний характер.
- Вперше в кристалах хромоборатів з сильноанізотропними рідкісноземельними іонами ( $TbCr_3(VO_3)_4$  та  $DyCr_3(VO_3)_4$ ) 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».

- Вперше для рідкісноземельних хромоборатів спостережено індуковану зовнішнім магнітним полем електричну поляризацію на прикладі сполук з гадолінієм та тербієм.

Результати досліджень, що викладені в дисертаційній роботі, є **достовірними та обґрунтованими**, оскільки вони були отримані за допомогою кількох експериментальних методів (СКВІД–магнітометрія, резонансна методика, електрометрія в імпульсному магнітному полі, релаксаційна методика вимірів питомої теплоємності) на сучасному обладнанні, а їх аналіз проводився згідно існуючих теоретичних моделей та уявлень.

**Наукова та практична цінність отриманих результатів.** Результати досліджень, які представлені в дисертаційній роботі, доповнюють і розширюють існуючі уявлення про магнітні, резонансні і теплові властивості рідкісноземельних феро- та хромоборатів. Вони сприятимуть розвитку теорії та побудові мікроскопічних моделей для опису фізичних властивостей складних багатокомпонентних магнетиків, що містять взаємодіючі ланцюжки  $3d$  металів та взаємодіють з рідкісноземельною підсистемою таких магнетиків. Сильний зв'язок між магнітною та зарядовою підсистемами кристалів цих сполук у поєднанні з можливістю керування їх властивостями за допомогою контрольованого розбавлення  $3d$  та/або  $4f$  магнітних підсистем вказує на можливість їх практичного застосування в якості сенсорів магнітного поля. Результати, отримані в дисертаційній роботі також можуть бути використані в наукових установах, в яких ведуться теоретичні та експериментальні дослідження властивостей складних магнітних оксидів.

Наукові результати, що представлені в дисертаційній роботі, опубліковані в 6 статтях у фахових журналах та в достатній мірі апробовані на вітчизняних та міжнародних наукових конференціях. Тези доповідей опубліковані у відповідних збірках тез.

Автореферат вірно відображає основний зміст та структуру дисертації.

По змісту дисертації можна зробити наступні **зауваження**:

- *У роботі визначено досить велику кількість параметрів, що характеризують магнітні властивості рідкісноземельних хромоборатів. Доречним було б зібрати ці дані в узагальнюючу таблицю, як це зроблено для фероборатів, для полегшення співставлення отриманих результатів.*

- *Додаткова інформація щодо антиферомагнітного резонансу в лантановому хромобораті могла б допомогти при аналізі експериментальних даних для кристалів з магнітними рідкісноземельними іонами.*

- *На мою думку, автору слід було б детальніше проаналізувати причину виникнення та природу температурно-індукованого спін-переорієнтаційного*

*фазового переходу від антиферромагнітного стану з анізотропією типу «легка вісь» до стану з анізотропією типу «легка площина» в кристалах  $TbCr_3(BO_3)_4$  і  $DyCr_3(BO_3)_4$ , а також залежність температур переходу від типу рідкісноземельного іона.*

Зазначені зауваження не носять принципового характеру та не знижують загального позитивного враження від роботи.

**Висновок.** Дисертаційна робота Блудова О.М. є завершеною науковою працею, яка виконана на високому науковому рівні. Вона повністю відповідає спеціальності 01.04.11 – магнетизм. У дисертаційній роботі вирішено важливу задачу в області фізики магнетизму а саме: експериментально виявлено особливості антиферромагнітного резонансу і магнітних фазових переходів в монокристалі празеодимового фероборату та хромоборатах із лантаном, гадолінієм, тербієм та диспрозієм.

На мою думку, за актуальністю, новизною отриманих результатів, їх достовірністю та обґрунтованістю дисертаційна робота Блудова О.М. «Особливості резонансних властивостей та магнітних фазових перетворень в празеодимовому феробораті та рідкісноземельних хромоборатах» повністю відповідає вимогам МОН України до кандидатських дисертацій, зокрема пп. 9, 11 та 12 Порядку присудження наукових ступенів, а її автор, Олексій Миколайович Блудов, заслуговує на присудження йому наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.11 – магнетизм.

Офіційний опонент:

доктор фізико-математичних наук, професор  
завідувач відділу фізики плівок

Інституту магнетизму НАН України та МОН України

О.І. Товстолиткін

Підпис Олександра Івановича Товстолиткіна засвідчую:

Вчений секретар

Інституту магнетизму НАН України та МОН України,

кандидат фізико-математичних наук



А.О. Хребтов