

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу
ТЕРЕХОВА Андрія Валерійовича «Електронні, магнітні та надпровідні властивості мультифункціональних матеріалів на основі перехідних та рідкісноземельних елементів»,

що подана на здобуття ступеня доктора фізико-математичних наук
за спеціальністю 01.04.07 – «фізика твердого тіла»

1. Актуальність теми дослідження

Дослідження мультифункціональних матеріалів на основі перехідних і рідкісноземельних елементів важливе завдяки виявленню в них нових фізичних явищ — нетрадиційної надпровідності, магнітних перетворень і гігантського магнітоопору, що поглиблює знання у фізиці твердого тіла та відкриває перспективи застосувань в електроніці, спінтроніці й квантових технологіях.

Актуальність дисертаційної роботи зумовлена колом невирішених питань, що стосуються: механізмів надпровідного спарювання та співіснування надпровідності й магнетизму у рідкісноземельних боридах родію, потрійних халькогенідах молібдену та залізовмісних ВТНП; природи магнітоопору в твердих розчинах Bi-Mn ; а також особливостей поведінки поверхневого електроопору MgB_2 у радіохвильовому діапазоні.

Отримані результати формують основу для прогнозування та конструювання новітніх перспективних матеріалів із керованими властивостями для спінтроніки й квантових обчислень.

2. Новизна наукових положень і результатів, поданих на захист.

Наукові положення та результати, які подано на захист в рамках дисертаційної роботи Терехова А.В., є новими, отриманими вперше та оригінальними. Серед таких результатів, найбільш цікавими є наступні: в надпровідних сполуках різних класів за допомогою сучасних експериментальних методик виявлено поведінку низки надпровідних параметрів, яка непритаманна звичайним синглетним надпровідникам та може бути пояснена в рамках механізмів надпровідного спарювання в тому числі й триплетного; наведено докази, що в рідкісноземельних боридах родію з диспрозієм перехід в надпровідний стан відбувається з феримагнітного або феромагнітного, й з подальшим зниженням температури спостерігається ще одне магнітне перетворення, яке співіснує з надпровідністю; виявлено ефект Воллебена в рідкісноземельних боридах родію з диспрозієм; спостережено немонотонну поведінку температурних залежностей електроопору, високий додатний магнітоопір до 3033% у полі 140 кЕ та сильну анізотропію електричного транспорту в твердому розчині $\text{Bi}_{95.69}\text{Mn}_{3.69}\text{Fe}_{0.62}$, які пояснені в рамках багатозонної теорії та впливом внутрішнього магнетизму фази $\alpha\text{-BiMn}$ на електропровідність вісмутової матриці; у дибориді магнію MgB_2 виявлено перехід від піппардівської нелокальної межі при температурах, значно нижчих за критичну температуру надпровідного переходу, до лондонської локальної межі поблизу цієї температури.

3. Обґрунтованість і достовірність наукових результатів, висновків і рекомендацій

Наукові результати дисертації А. В. Терехова відзначаються високим ступенем обґрунтованості та достовірності. Це забезпечується використанням сучасних експериментальних методів дослідження, що пройшли багаторічну апробацію у світовій практиці, а також коректним застосуванням перевірених теоретичних підходів фізики твердого тіла, магнетизму й надпровідності для аналізу експериментальних даних. Про достовірність отриманих у роботі результатів свідчить і те, що вони опубліковані в авторитетних високореєтингових наукових журналах та неодноразово представлені на міжнародних і всеукраїнських конференціях.

4. Повнота викладення наукових результатів дисертації в опублікованих роботах, апробація результатів

Основні наукові результати дисертації Терехова А.В. викладено у **40 наукових працях**, з них: **22 статті** у провідних наукових фахових міжнародних та вітчизняних наукових виданнях: віднесені до другого квартилю (**Q2**) — **3 статті**, до третього квартилю (**Q3**) — **17 статей** відповідно до класифікації SCImago Journal & Country Rank; у наукових періодичних виданнях, включених до Переліку наукових фахових видань України — **2 статті**. Одна стаття опублікована без співавторів; **18 публікацій тез наукових доповідей** в матеріалах наукових конференцій. На підставі ознайомлення з публікаціями можна зробити висновок, що вони повністю відображають основні результати дисертаційної роботи.

Дисертаційна робота складається зі вступу, семи розділів, висновків, списку використаних джерел, що містить **297** найменувань, Додатку А (список публікацій здобувача за темою дисертації) та Додатку Б (відомості про апробацію результатів дисертації). Повний обсяг — **326** сторінок. Далі розглянемо результати основних розділів у відповідній послідовності.

У *вступі* обґрунтовано актуальність наукової роботи, представлено мету, об'єкт, предмет та методи наукових досліджень, зазначено особистий внесок дисертанта у проведених дослідженнях, висвітлено новизну отриманих результатів, їх наукове та практичне значення.

Перший розділ присвячено опису методів дослідження, використаних для отримання достовірних експериментальних даних під час комплексного вивчення температурних та магнітопольових залежностей магнітних, електричних і теплових властивостей досліджуваних матеріалів. Це дозволило ефективно розв'язати завдання, поставлені в дисертаційній роботі.

У *другому розділі* проаналізовано структурні зміни та характер температурної залежності питомого і поверхневого електроопору (у радіочастотному діапазоні) дибориду магнію MgB_2 . Виявлено структурну нестійкість поблизу температури надпровідного переходу та вперше детально вивчено особливості поведінки поверхневого електроопору в діапазоні частот 9–110 МГц вище та нижче за температуру переходу в надпровідний стан.

Третій розділ присвячено комплексному дослідженню структурних, магнітних та електричних характеристик твердого розчину Bi-Mn — перспективного магнітного матеріалу. В розділі показано, що матеріал з низькою концентрацією марганцю ($\text{Bi}_{95,69}\text{Mn}_{3,69}\text{Fe}_{0,62}$) виявляє гігантський додатний магнітоопір при низьких температурах. Саме з'ясуванню природи гігантського

магнітоопору та аномалій температурних залежностей електроопору цього матеріалу в магнітних полях й присвячено значну частину цього розділу.

У четвертому розділі подано результати комплексних досліджень, спрямованих на вивчення природи особливостей надпровідного та нормального стану в халькогенідах молібдену з гадолінієм $\text{Gd}_x\text{Pb}_{1-x}\text{Mo}_6\text{S}_8$ ($x = 0,5; 0,7; 0,9$). За допомогою аналізу спектрів мікроконтактної спектроскопії андреєвського відбиття та температурних залежностей верхнього критичного поля виявлено ознаки існування в цих сполуках нетрадиційної надпровідності.

У п'ятому розділі досліджено специфіку поведінки надпровідних характеристик нового залізовмісного надпровідника $\text{EuFeAsO}_{0,85}\text{F}_{0,15}$. Важливим результатом цього розділу є виявлення одно- та двощілинних спектрів андреєвського відбиття в точкових контактах $\text{Au-EuFeAsO}_{0,85}\text{F}_{0,15}$, що в роботі пояснюється наявністю анізотропної $s\pm$ -симетрії надпровідного параметра порядку в цій сполуці.

Шостий розділ присвячено вивченню співіснування надпровідності та феримагнетизму в рідкісноземельних бориди родію $\text{Dy}_{1-x}\text{Y}_x\text{Rh}_4\text{B}_4$. Основними результатами тут є: виявлення співіснування надпровідності та феромагнетизму в широкому інтервалі температур; спостереження аномальної поведінки надпровідної щілини та верхнього критичного поля від температури та надпровідної щілини від магнітного поля, які є несприятливими звичайним надпровідникам із синглетним типом надпровідного спарювання; виявлення ефекту Воллебена.

У останньому сьомому розділі детально вивчено особливості співіснування надпровідності та феромагнетизму в рідкісноземельному бориді родію з диспрозієм $\text{Dy}_{0,6}\text{Y}_{0,4}\text{Rh}_{3,85}\text{Ru}_{0,15}\text{B}_4$ в якому родій частково заміщується рутенієм, що призводить до змін в магнітній підсистемі та впливає на надпровідні характеристики. Разом із цим у розділі обговорюється, як заміна одного магнітного рідкісноземельного іона Dy на інший — Er — впливає на надпровідні характеристики боридів $\text{Dy}_{1-x}\text{Er}_x\text{Rh}_{3,8}\text{Ru}_{0,2}\text{B}_4$ ($x=0, 0,2$ та $0,4$). Виявлена аномальна поведінка $H_{c2}(T)$ та $\Delta(H)$ свідчить про можливість, ймовірно триплетного, механізму надпровідного спарювання в цих сполуках.

5. Зауваження

За змістом дисертації можна зробити такі зауваження:

- 1) У тексті дисертації подекуди трапляються описки та стилістичні огріхи. Загалом робота написана чітко й послідовно, однак іноді використання надто довгих і складних речень ускладнює сприйняття матеріалу.
- 2) У роботі представлено дослідження низькотемпературної теплоємності рідкісноземельних боридів родію з диспрозієм. Водночас не проведено виокремлення фононного, електронного та магнетного внесків у теплоємність. За допомогою цього можна було би спробувати оцінити величину надпровідної щілини в цих сполуках.
- 3) У роботі наведено результати досліджень андреєвського відбиття в низці надпровідників методом реєстрації мікроконтактних спектрів перших похідних вольт-амперних характеристик. Водночас не подано графіків вольт-амперних характеристик у надпровідному стану, що дало б змогу оцінити надлишковий струм і користуючись відомим співвідношенням

$$I_{exc} = \frac{4}{3} \frac{\Delta_{eff}}{eR_N} \text{ між надлишковим струмом та енергетичною щільністю,}$$

порівняти ці дані з вимірами похідних характеристик контактів. Крім того, не побудовано температурних та польових залежностей надлишкового струму, які є важливими при дослідженні надпровідників з нетрадиційним механізмом надпровідного спарювання.

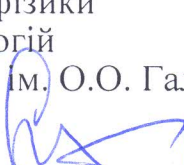
Наведені зауваження носять рекомендаційний характер і не знижують високої оцінки дисертації, її наукової новизни, достовірності та наукової цінності здобутих результатів. Дисертація добре структурована та написана належною для наукової роботи мовою. Її результати опубліковано у фахових наукових виданнях із високим імпаکت-фактором. Опубліковані праці повно й коректно відображають зміст і висновки дисертаційної роботи. У дисертації та публікаціях здобувача не виявлено академічного плагіату, фабрикації чи фальсифікації результатів. Дисертація А. В. Терехова є завершеним науковим дослідженням, у якому отримано нові науково обґрунтовані результати, що в сукупності розв'язують важливу наукову проблему фізики твердого тіла, а саме — встановлено вплив внутрішнього магнетизму та багатозонної електронної структури на походження аномальних електричних властивостей та нетрадиційних механізмів надпровідності у мультифункціональних матеріалах на основі перехідних і рідкісноземельних елементів в залежності від температури та магнітного поля.

Вважаю, що, враховуючи актуальність обраної теми, новизну та наукову значущість отриманих результатів, достовірність і обґрунтованість висновків, дисертаційна робота **«Електронні, магнітні та надпровідні властивості мультифункціональних матеріалів на основі перехідних та рідкісноземельних елементів»** повністю задовольняє вимогам до докторських дисертацій, зокрема, п. 7–9 «Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук», затвердженого постановою Кабінету міністрів України від 17 листопада 2021 р., №1197 «Деякі питання присудження (позбавлення) наукових ступенів» (із змінами, внесеними згідно з Постановами Кабінету міністрів України № 502 від 19.05.2023 та № 507 від 03.05.2024), та вимогам до оформлення дисертації, затвердженими наказом Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017 №40 (зі змінами), а її автор, Андрій Валерійович Терехов, поза сумнівом, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 – «фізика твердого тіла».

Офіційний опонент:

доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник,
старший науковий співробітник відділу фізики
високих тисків та перспективних технологій

Донецького фізико-технічного інституту ім. О.О. Галкіна
НАН України (м. Київ)

  **Володимир ТАРЕНКОВ**

Підпис Володимира Таренкова ЗАСВІДЧУЮ

В.о. директора Донецького фізико-технічного інституту
ім. О.О. Галкіна НАН України (м. Київ)


Володимир КРИВОРУЧКО