

Рецензія

провідного наукового співробітника відділу
магнітних і пружних властивостей твердих тіл
ФТІНТ ім. Б. І. Веркіна НАН України,
доктора фізико-математичних наук, професора
Сіренко Валентини Анатоліївни
на дисертаційну роботу

Ярового Валерія Михайловича

«Особливості поведінки магнітоопору в твердих розчинах Bi-Mn з низьким
вмістом марганцю»,

яка подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії
за спеціальністю 104 - «Фізика та астрономія»
з галузі знань 10 - «Природничі науки»

Актуальність дисертаційної роботи В. М. Ярового «Особливості поведінки магнітоопору в твердих розчинах Bi-Mn з низьким вмістом марганцю» зумовлена сучасним інтересом до матеріалів, електричними властивостями яких можна ефективно керувати зовнішнім магнітним полем. Особливу увагу в цьому контексті часто привертають матеріали з великим та анізотропним магнітоопором, дослідження яких є важливим як для поглиблення уявлень про механізми електронного транспорту в перспективних напівметалевих системах, так і для оцінки перспектив їх використання у спінтроніці, магнітоелектроніці та інших напрямках сучасної функціональної електроніки. Саме до таких систем належать тверді розчини Bi-Mn , у яких поєднуються особливості електронної структури вісмуту та вплив магнітної компоненти.

Вісмут є унікальним напівметалом із малою концентрацією та високою рухливістю носіїв заряду, складною багатозонною і багатодолинною електронною структурою та вираженою анізотропією транспортних властивостей. Завдяки цьому його електричний опір надзвичайно чутливий до дії магнітного поля. Введення марганцю та утворення магнітної фази $\alpha\text{-BiMn}$ додатково модифікують умови перенесення і розсіювання носіїв заряду, впливають на їх рухливість і можуть істотно змінювати величину та характер магнітоопору. Тому система Bi-Mn є зручною модельною системою для дослідження взаємодії орбітальних, магнітних та можливих квантових механізмів магнітотранспорту.

Особливої актуальності набуває встановлення того, як зміна концентрації Mn, температури, величини та орієнтації зовнішнього магнітного поля впливає на транспортну відповідь матеріалу. Не менш важливим є з'ясування природи максимумів на температурних і магнітопольових залежностях електричного опору, а також ролі текстури полікристалічних зразків у формуванні анізотропії магнітоопору. Розв'язання цих питань дає змогу не лише поглибити фундаментальні уявлення про перенесення заряду у багатокомпонентних напівметалевих системах, а й визначити фізичні чинники, за допомогою яких можна цілеспрямовано змінювати їх магніторезистивні характеристики.

Результати дисертації отримано в межах відомчої науково-дослідної теми «Провідні, надпровідні, магнітні та сенсорні властивості новітніх функціональних матеріалів» (№ державної реєстрації 0122U001501, шифр Ф 19-5, 2022–2026 рр.), а також міжнародного проєкту «Квантова динаміка в нових халькогенідних матеріалах і пристроях» (STCU № 7120, 2024–2026 рр.).

Результати, одержані під час виконання дисертаційного дослідження, достатньою мірою апробовані та представлені в наукових публікаціях. За тематикою роботи опубліковано 13 наукових праць, серед яких 3 статті у міжнародних фахових виданнях, що індексуються в базах Scopus та Web of Science, а також 10 тез доповідей, оприлюднених у матеріалах міжнародних наукових конференцій..

Дисертаційна робота викладена на **145 сторінках** і включає **49 рисунків**, **2 таблиці** та бібліографічний список із **103 джерел**. Її структура охоплює анотації українською та англійською мовами, вступну частину, п'ять основних розділів, загальні висновки та додатки.

У першому розділі наведено огляд сучасного стану досліджень матеріалів на основі вісмуту. Проаналізовано відомості про кристалічну та електронну структуру Bi, особливості його магнітних і транспортних властивостей, а також наявні літературні дані щодо системи Bi–Mn. Це дозволило окреслити коло невирішених питань і сформулювати фізичні передумови для подальшої експериментальної частини роботи.

У другому розділі викладено методику одержання текстурованих полікристалічних зразків методом Бріджмена, представлено результати їх структурно-фазової та елементної атестації, а також охарактеризовано

експериментальні методи дослідження електротранспортних властивостей у широких діапазонах температур і магнітних полів.

Основний масив експериментальних даних представлено у **третьому та четвертому** розділах. У них проаналізовано температурну й польову поведінку електричного опору твердих розчинів $\text{Bi}_{95,69}\text{Mn}_{3,69}\text{Fe}_{0,62}$ та $\text{Bi}_{88,08}\text{Mn}_{11,92}$. Особливу увагу приділено порівнянню результатів, отриманих для двох взаємних орієнтацій магнітного поля і транспортного струму, що дало змогу простежити прояв анізотропії магнітоопору та встановити її залежність від температури, магнітного поля і складу зразків.

У **п'ятому розділі** проведено системний фізичний аналіз одержаних результатів. Розглянуто роль вісмутової матриці, концентрації Mn, багатозонної та багатодолинної електронної структури, магнітної фази $\alpha\text{-BiMn}$ і текстури полікристалічних зразків у формуванні їх магнітотранспортних властивостей. Окрему увагу приділено можливому внеску квантових ефектів у виникнення низькотемпературних особливостей магнітоопору. На основі сукупності експериментальних даних запропоновано фізичне пояснення зменшення величини та зміни анізотропії магнітоопору зі зростанням вмісту марганцю, а також появи характерних максимумів на магнітопольових залежностях за низьких температур.

Обґрунтованість і достовірність наукових результатів дисертації визначаються належним рівнем експериментального забезпечення роботи та послідовним аналізом одержаних даних. Електротранспортні характеристики зразків вивчали в широкому діапазоні температур і магнітних полів із застосуванням чотириконтактної схеми вимірювань. Основний масив експериментальних даних отримано на системі Quantum Design PPMS та спеціалізованій установці ФТІНТ ім. Б. І. Веркіна НАН України. Відомості про структурний стан, фазовий склад і елементний склад досліджуваних матеріалів одержано за допомогою рентгенодифракційних досліджень та електронної мікроскопії.

Важливим елементом аналізу є також порівняння отриманих результатів із даними для чистого вісмуту, що дає змогу більш аргументовано оцінити роль Bi-матриці у формуванні характерних залежностей магнітоопору. Інтерпретація виявлених особливостей ґрунтується на сукупному врахуванні електронної

структури вісмутової матриці, її багатозонного та багатодолинного характеру, впливу магнітної фази α -BiMn, а також можливого прояву квантових механізмів за низьких температур і високих магнітних полів.

Висновки, зроблені на основі експериментальних даних, зіставлено з результатами попередніх експериментальних і теоретичних досліджень, представленими у фаховій науковій літературі. Таке зіставлення дозволяє оцінити фізичну обґрунтованість запропонованих у роботі пояснень і підтверджує несуперечливість отриманих результатів сучасним уявленням про магнітотранспорт у системах на основі вісмуту.

Зауваження до дисертаційної роботи:

1. Структурний аналіз зразків проводився при кімнатній температурі, тоді як на температурній залежності опору $\text{Bi}_{88,08}\text{Mn}_{11,92}$ спостерігається характерний перегин поблизу 70 К. Було б цікаво доповнити роботу температурно-залежними структурними дослідженнями, які дозволили б остаточно виключити можливий структурний внесок у появу цієї особливості.
2. Порівняння температурних залежностей електричного опору досліджених твердих розчинів із чистим вісмутом проведено безпосередньо лише для конфігурації $H \perp I$ у магнітному полі 30 кЕ. Враховуючи важливу роль Bi-матриці в запропонованій інтерпретації результатів, бажано було б розширити таке експериментальне порівняння на інші значення магнітного поля та обидві геометрії вимірювання.
3. У дисертаційній роботі основну увагу приділено вимірюванням електричного опору та магнітоопору. Які інші експериментальні методи дослідження могли б бути використані для більш повного з'ясування механізмів електричного транспорту в твердих розчинах Bi–Mn і яку додаткову інформацію вони могли б надати?

Зазначені зауваження мають переважно рекомендаційний характер і не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи.

У цілому дисертація Ярового Валерія Михайловича «Особливості поведінки магнітоопору в твердих розчинах Bi–Mn з низьким вмістом марганцю» є самостійним, цілісним і завершеним науковим дослідженням, у

якому отримано нові результати, сформульовано аргументовані висновки та розв'язано поставлені наукові завдання. За змістом, структурою, рівнем виконання та оформлення робота відповідає вимогам пунктів 7, 8 і 9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44, зі змінами, внесеними постановами Кабінету Міністрів України від 21 березня 2022 р. № 341, від 19 травня 2023 р. № 502 та від 3 травня 2024 р. № 507.

Представлені в дисертації висновки ґрунтуються на достовірних експериментальних результатах, одержаних здобувачем, логічно пов'язані з метою та завданнями роботи й належним чином обґрунтовані. Дисертація характеризується внутрішньою цілісністю, послідовністю викладу та дотриманням принципів академічної доброчесності.

З огляду на викладене вважаю, що Яровий Валерій Михайлович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 – «Фізика та астрономія» галузі знань 10 – «Природничі науки».

Рецензент:

Провідний науковий співробітник відділу
магнітних і пружних властивостей твердих тіл
ФТІНТ ім. Б. І. Веркіна НАН України,
доктор фізико-математичних наук,
професор

Сш

Валентина СІРЕНКО

