

Рецензія

наукового співробітника відділу мікроконтактної спектроскопії

ФТІНТ ім. Б.І. Веркіна НАН України,

кандидата фізико-математичних наук

Дзюби Михайла Олеговича

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»

Дисертаційна робота В. М. Ярового «Особливості поведінки магнітоопору в твердих розчинах Bi-Mn з низьким вмістом марганцю» присвячена дослідженню магнітотранспортних властивостей твердих розчинів системи Bi-Mn та встановленню впливу концентрації марганцю на величину, анізотропію і механізми формування магнітоопору. Особливий інтерес до таких матеріалів зумовлений тим, що вісмутова матриця характеризується складною багатозонною й багатодолинною електронною структурою, тоді як присутність магнітної фази $\alpha\text{-BiMn}$ створює додаткові механізми впливу на перенесення та розсіювання носіїв заряду.

Актуальність дисертаційної роботи визначається сучасним інтересом до пошуку та дослідження матеріалів із великим анізотропним і керованим зовнішнім магнітним полем електричним опором, які є перспективними для розвитку спінтроники, магніточутливої сенсорики та інших напрямів функціональної електроніки. У цьому аспекті особливий інтерес становлять тверді розчини системи Bi-Mn з низьким вмістом марганцю, в яких складна багатозонна та багатодолинна електронна структура вісмуткової матриці поєднується з впливом магнітної фази $\alpha\text{-BiMn}$. Таке поєднання створює можливість істотної зміни процесів перенесення та розсіювання носіїв заряду під

дією магнітного поля і, відповідно, формування великого та анізотропного магнітоопору.

Водночас закономірності впливу концентрації Mn, температури, величини й орієнтації магнітного поля на магнітотранспортні властивості текстурованих полікристалічних твердих розчинів Bi–Mn залишаються недостатньо з'ясованими. Недостатньо визначеною є також роль магнітної фази α -BiMn, багатодолинної електронної структури вісмуту та можливих квантових ефектів у формуванні їхніх температурних і магнітопольових характеристик. Встановлення цих закономірностей є важливим як для поглиблення фундаментальних уявлень про особливості магнітотранспорту в різноманітних напівметалічних системах, так і для визначення можливостей цілеспрямованого керування їх електричними властивостями та оцінки перспектив використання таких матеріалів у магніточутливих резистивних елементах, системах контролю магнітних полів і спінтронних пристроях.

Дослідження виконувались у межах тематичного плану ФТІНТ ім. Б.І. Веркіна НАН України за темою «Провідні, надпровідні, магнітні та сенсорні властивості новітніх функціональних матеріалів» (№ 0122U001501, 2022–2026 рр.) та міжнародного проєкту STCU № 7120 «Квантова динаміка в нових халькогенідних матеріалах і пристроях» (2024–2026 рр.).

Основні результати опубліковано у 13 наукових працях, серед яких 3 статті у фахових виданнях, що індексуються Scopus та Web of Science, і 10 тез доповідей міжнародних конференцій.

Структура дисертаційної роботи та основні результати.

Дисертація має обсяг **145** сторінок, містить **49** рисунків, **2** таблиці та **103** найменування у списку використаних джерел. Робота складається з анотацій українською й англійською мовами, вступу, п'яти розділів, висновків і додатків.

У першому розділі систематизовано літературні дані щодо структури, електронної будови, магнітних і транспортних властивостей Bi та Bi–Mn.

У другому розділі описано синтез текстурованих полікристалічних зразків методом Бріджмена, їх структурно-фазову й елементну атестацію та методики електротранспортних вимірювань.

Третій і четвертий розділи містять експериментальні результати щодо температурних та магнітопольових залежностей опору для $\text{Bi}_{95,69}\text{Mn}_{3,69}\text{Fe}_{0,62}$ і $\text{Bi}_{88,08}\text{Mn}_{11,92}$ у двох геометріях вимірювання.

П'ятий розділ є узагальнюючим: у ньому розглянуто роль Ві-матриці, концентрації Mn, багатозонної та багатодолинної електронної структури, магнітної фази $\alpha\text{-BiMn}$, текстури полікристалічних зразків і можливих квантових ефектів у формуванні магнітотransпортних властивостей та особливостей температурних і магнітопольових залежностей електричного опору досліджених твердих розчинів. Розглянуто основні механізми, що визначають величину й анізотропію магнітоопору, та запропоновано пояснення його зменшення зі зростанням концентрації Mn і появи низькотемпературних максимумів на польових залежностях.

Отримані результати мають фундаментальне значення для розуміння механізмів магнітотransпорту у багатокомпонентних системах на основі вісмуту. Встановлені закономірності зміни магнітоопору з температурою, полем, концентрацією Mn та геометрією вимірювання можуть бути корисними для подальшого цілеспрямованого вибору оптимального складу матеріалів із заданими магніторезистивними властивостями.

Обґрунтованість і достовірність отриманих у дисертаційній роботі результатів забезпечуються використанням сучасних та апробованих експериментальних методів дослідження структурних і електротransпортних властивостей матеріалів. Температурні та магнітопольові залежності електричного опору досліджувалися чотириконтактним методом на установці QuantumDesign PPMS, а також на прецизійній експериментальній установці ФТІНТ ім. Б. І. Веркіна НАН України в широких інтервалах температур і магнітних полів. Структурно-фазовий та елементний склад зразків контролювався методами рентгенівської дифракції та електронної мікроскопії.

Достовірність експериментальних результатів підтверджується систематичним характером отриманих температурних і магнітопольових залежностей, їх відтворюваністю для різних орієнтацій магнітного поля відносно транспортного струму, а також порівнянням результатів для двох складів твердих

розчинів і чистого вісмуту. Показано, що магнітоопір залишається додатним у всьому дослідженому діапазоні полів і температур, при цьому в поперечній конфігурації його величина істотно перевищує значення для поздовжньої конфігурації. Виявлені закономірності пояснюються з урахуванням багатозонної та багатодолинної електронної структури вісмутової матриці, впливу магнітної фази α -BiMn, а також можливих квантових ефектів. Додатковим свідченням достовірності отриманих результатів є їх узгодження з експериментальними та теоретичними даними, наведеними у провідних фахових наукових публікаціях, що дало змогу підтвердити коректність запропонованого пояснення встановлених закономірностей.

Таким чином, отримані результати є достатньо обґрунтованими, достовірними та мають істотне наукове значення для поглиблення уявлень про механізми магнітотранспорту в твердих розчинах системи Bi–Mn.

Зауваження до дисертаційної роботи:

1. У роботі вплив концентрації марганцю на магнітотранспортні властивості встановлюється шляхом порівняння двох складів із вмістом Mn 3,69 та 11,92 ат. %. Було б доцільно окремо обговорити, наскільки встановлені закономірності можуть бути поширені на весь інтервал низьких концентрацій Mn та чи можливе існування немонотонної концентраційної залежності магнітоопору між дослідженими складами.
2. Для $\text{Bi}_{88,08}\text{Mn}_{11,92}$ у діапазоні 4–14 К встановлено залежність $R \sim T^2$. У роботі зазначається, що подібна поведінка у чистому вісмуті може бути пов'язана як зі специфічним міждолинним електрон-фононним розсіюванням, так і з електрон-дірковою взаємодією. Було б не зайвим більш детально обговорити, який із цих механізмів є найбільш імовірним для дослідженого твердого розчину та чи може фаза α -BiMn додатково впливати на квадратичний характер залежності.
3. У роботі детально порівнюється магнітоопір твердих розчинів Bi–Mn із двома концентраціями марганцю в конфігураціях $H \perp I$ та $H \parallel I$. Водночас використана експериментальна система дає змогу змінювати орієнтацію зразка в діапазоні кутів 0–360°, тому для більш повної

кількісної характеристики анізотропії магнітоопору було б доцільно провести відповідні вимірювання та навести його кутові залежності.

Наведені зауваження є побажаннями, які жодним чином не впливають на загальну високу оцінку роботи.

Підсумовуючи, відзначу, що дисертаційна робота Ярового Валерія Михайловича «Особливості поведінки магнітоопору в твердих розчинах Bi-Mn з низьким вмістом марганцю» є оригінальною, завершеною науковою працею та 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. Дисертація містить обґрунтовані висновки, сформульовані на основі достовірних результатів, отриманих здобувачем, характеризується єдністю змісту та відповідає принципам академічної доброчесності. Її автор, Яровий Валерій Михайлович, безумовно заслуговує на присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 – «Фізика та астрономія» з галузі знань 10 – «Природничі науки».

Рецензент:

Науковий співробітник відділу

мікроконтактної спектроскопії

ФТІНТ ім. Б.І. Веркіна НАН України,

кандидат фізико-математичних наук



Михайло ДЗЮБА



підпис гр. *Михайла Дзюби*
ЗАСВІДЧУЮ
Учений секретар ФТІНТ
ім. Б.І. Веркіна НАН України
кандидат фізико-математичних наук
Дурабцева Л.М.