

Відгук

офіційного опонента

професора кафедри радіотехніки та радіоелектронних систем факультету радіофізики, електроніки та комп'ютерних систем Київського національного університету імені Тараса Шевченка, доктора фізико-математичних наук,
професора

Дехтярука Леоніда Васильовича

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.

Дисертаційна робота В. М. Ярового «Особливості поведінки магнітоопору в твердих розчинах Bi-Mn з низьким вмістом марганцю» присвячена дослідженню магнітотransпортних властивостей твердих розчинів системи Bi-Mn з низьким вмістом марганцю та встановленню механізмів формування в них значного й анізотропного магнітоопору. Вивчення таких матеріалів є важливим для з'ясування особливостей перенесення та розсіювання носіїв заряду, змін електронної структури під дією магнітного поля, а також ролі магнітної складової у формуванні транспортних характеристик. Особливий інтерес становить вісмут, який завдяки малій концентрації та високій рухливості носіїв заряду, складній багатозонній і багатодолинній електронній структурі та її вираженій анізотропії характеризується значним додатним магнітоопором. Введення марганцю та формування магнітної фази $\alpha\text{-BiMn}$ створює додаткові механізми впливу на електричний транспорт, пов'язані зі зміною умов розсіювання та рухливості носіїв заряду і характеру їх відгуку на зовнішнє магнітне поле. Зокрема, у дисертаційній роботі увагу зосереджено на

встановленні впливу концентрації Mn на величину та анізотропію магнітоопору, з'ясуванні природи максимумів на температурних і магнітопольових залежностях електричного опору, а також визначенні ролі орбітального, магнітного та можливого квантового внесків у формування магнітотransпортних властивостей. Особливу увагу приділено впливу структурної текстури полікристалічних зразків на процеси перенесення заряду.

Слід зазначити, що магнітотransпортні властивості текстурованих полікристалічних твердих розчинів Bi-Mn із вмістом марганцю до 12 ат. % до цього часу залишаються недостатньо дослідженими. Отримані в дисертаційній роботі результати дають змогу поглибити уявлення про роль вісмуткової матриці, магнітної фази α -BiMn та структурної текстури у формуванні електричних і магнітотransпортних властивостей таких матеріалів. Таким чином, тема дисертаційної роботи, яка спрямована на комплексне дослідження механізмів формування магнітоопору в твердих розчинах системи Bi-Mn із низьким вмістом марганцю та встановлення взаємозв'язку між їх складом, структурою і транспортними властивостями, є безперечно актуальною.

Актуальність досліджень дисертаційної роботи В. М. Ярового підтверджується також тим, що вони є складовою частиною тематичного плану Фізико-технічного інституту низьких температур ім. Б.І. Веркіна НАН України за науково-дослідною роботою відомчої тематики «Провідні, надпровідні, магнітні та сенсорні властивості новітніх функціональних матеріалів» (номер державної реєстрації 0122U001501, шифр Ф 19-5, термін виконання 2022 - 2026рр.) та міжнародного наукового проєкту «Квантова динаміка в нових халькогенідних матеріалах і пристроях» (STCU № 7120, термін виконання 2024-2026 рр.).

Основні результати дисертаційної роботи опубліковані у 13 наукових працях, з яких 3 статті у провідних міжнародних фахових виданнях, що індексуються у міжнародних наукометричних базах Scopus та Web of Science, та 10 тез доповідей у збірниках матеріалів міжнародних наукових конференцій.

Обґрунтованість і достовірність отриманих наукових результатів та сформульованих висновків забезпечуються застосуванням загальноприйнятих

і добре апробованих експериментальних методів дослідження фізичних властивостей матеріалів. Експериментальні вимірювання проводилися як на сучасному обладнанні провідних наукових центрів, так і на установці відділу, яка була оснащена сучасною вимірювальною апаратурою та засобами автоматизації експерименту. Отримані експериментальні залежності та фізичні характеристики аналізувалися і оброблялися із використанням загальноприйнятих та апробованих теоретичних підходів фізики твердого тіла. Додатковим підтвердженням достовірності одержаних результатів є їх зіставлення з експериментальними й теоретичними даними, опублікованими у провідних фахових наукових виданнях, що дозволило обґрунтувати запропоновану інтерпретацію встановлених закономірностей.

Структура дисертаційної роботи.

Дисертація складається з анотації, вступу, п'яти розділів з рисунками, висновків і списку використаних джерел. Загальний обсяг дисертації становить **145** сторінок. Робота містить **49** рисунків, **2** таблиці та список використаних джерел з **103** найменувань на **13** сторінках.

Кожен розділ є структурованим і завершується висновками.

Анотація дисертації наведена українською та англійською мовами. В ній відображено зміст та основні наукові результати.

У **вступі** автор визначає основні завдання дослідження, мету та стисло описує актуальність вибору теми дослідження, зазначає об'єкт, предмет та методи дослідження. Окрім того, у цьому розділі сформульовано наукову новизну, описано практичне значення отриманих результатів, наведено відомості про публікації, особистий внесок здобувача та апробацію результатів дисертації.

У **першому розділі** «Структурні, магнітні та електричні властивості твердих розчинів Bi-Mn та вісмуту» узагальнено й проаналізовано сучасні уявлення про структурні, магнітні та магнітотранспортні властивості вісмуту і твердих розчинів системи Bi-Mn . Розглянуто особливості багатозонної та багатодолинної електронної структури вісмуту, вплив легування марганцем на електронні властивості системи, магнітні перетворення у фазі $\alpha\text{-BiMn}$ та зняття

багатодолинного виродження під дією магнітного поля. Окрему увагу приділено температурним залежностям електричного опору за відсутності магнітного поля, а також особливостям магнітоопору чистого вісмуту і твердих розчинів Bi-Mn за різних взаємних орієнтацій магнітного поля та транспортного струму.

Другий розділ «Отримання зразків та методи експериментальних досліджень» присвячено методиці приготування текстурованих полікристалічних зразків $\text{Bi}_{95,69}\text{Mn}_{3,69}\text{Fe}_{0,62}$ та $\text{Bi}_{88,08}\text{Mn}_{11,92}$, їх структурно-фазовому й елементному аналізу, а також методам дослідження електротransпортних властивостей.

У третьому розділі «Температурні залежності магнітоопору твердих розчинів $\text{Bi}_{95,69}\text{Mn}_{3,69}\text{Fe}_{0,62}$ та $\text{Bi}_{88,08}\text{Mn}_{11,92}$ » досліджено температурні залежності електричного опору за відсутності та в присутності магнітного поля для двох його орієнтацій відносно транспортного струму. Порівняння з чистим вісмутом дало змогу встановити вплив концентрації Mn на характер електричного транспорту.

Показано, що магнітне поле спричиняє значне зростання опору та появу максимумів на залежностях $R(T)$, положення яких зміщується до вищих температур зі збільшенням поля. Для $\text{Bi}_{88,08}\text{Mn}_{11,92}$ такі максимуми спостерігаються в обох конфігураціях, тоді як для $\text{Bi}_{95,69}\text{Mn}_{3,69}\text{Fe}_{0,62}$ – лише за перпендикулярної орієнтації поля. Виявлені особливості пов'язано зі зміною внесків електронного й діркового транспорту, впливом магнітної фази $\alpha\text{-BiMn}$ та анізотропією магнітотransпортних властивостей.

У четвертому розділі «Магнітопольові залежності електроопору твердих розчинів $\text{Bi}_{95,69}\text{Mn}_{3,69}\text{Fe}_{0,62}$ та $\text{Bi}_{88,08}\text{Mn}_{11,92}$ » досліджено польові залежності магнітоопору за різних температур для паралельної та перпендикулярної орієнтацій магнітного поля відносно транспортного струму. Проведено порівняльний аналіз величини й анізотропії магнітоопору обох складів та їх зіставлення з даними для чистого вісмуту.

Показано, що магнітоопір є додатним у всьому дослідженому діапазоні, причому в поперечній конфігурації він істотно більший. Встановлено зміну

форми польових залежностей із температурою та концентрацією Mn. Для $\text{Bi}_{95,69}\text{Mn}_{3,69}\text{Fe}_{0,62}$ при 5 К виявлено максимуми поблизу 30–40 кЕ, пов'язані з наближенням електронної системи до квантової межі. Зі збільшенням вмісту Mn магнітоопір зменшується, а низькотемпературні особливості існують в більш широкому температурному інтервалі, що вказує на посилення впливу магнітної фази $\alpha\text{-BiMn}$.

У п'ятому розділі «Механізми формування магнітоопору в твердих розчинах $\text{Bi}_{95,69}\text{Mn}_{3,69}\text{Fe}_{0,62}$ та $\text{Bi}_{88,08}\text{Mn}_{11,92}$ » узагальнено експериментальні результати та визначено основні чинники, що формують магнітотранспортні властивості досліджених матеріалів. Показано провідну роль вісмутової матриці у перенесенні заряду та вплив магнітної фази $\alpha\text{-BiMn}$ на рухливість і розсіювання носіїв. Проаналізовано внесок багатозонної електронної структури, магнітної анізотропії, текстури зразків і можливих квантових ефектів. Запропоновано пояснення зменшення магнітоопору зі зростанням концентрації Mn та природи низькотемпературних максимумів польових залежностей.

Основні результати роботи висвітлено у розділі **висновки**.

Можна стверджувати, що результати, отримані в дисертаційній роботі В.М. Ярового «Особливості поведінки магнітоопору в твердих розчинах Bi–Mn з низьким вмістом марганцю», мають як фундаментальне, так і прикладне значення. Встановлені закономірності впливу концентрації Mn, температури та орієнтації магнітного поля відносно транспортного струму можуть бути використані для вибору оптимального складу матеріалу та режимів його роботи. Отримані результати створюють наукові передумови для подальшого дослідження твердих розчинів системи Bi–Mn як перспективних матеріалів для магніточутливих резистивних елементів, систем контролю магнітних полів і спінтронних пристроїв.

За змістом дисертації можна зробити такі **зауваження**:

1. При порівнянні твердих розчинів $\text{Bi}_{95,69}\text{Mn}_{3,69}\text{Fe}_{0,62}$ та $\text{Bi}_{88,08}\text{Mn}_{11,92}$ основна увага приділяється впливу зміни концентрації Mn. Водночас перший зразок додатково містить 0,62 ат. % Fe, тому доцільно було б детальніше обговорити можливий вплив цієї домішки на електротранспортні властивості.

2. У роботі вплив концентрації Mn на магнітотransпортні властивості твердих розчинів пов'язується, зокрема, зі збільшенням вмісту магнітної фази α -BiMn. Водночас кількісний вміст цієї фази та характер її розподілу в об'ємі зразків безпосередньо не визначалися, а її наявність встановлювалася на підставі даних елементного і структурного аналізу та фазової діаграми системи Bi-Mn.

3. Максимуми магнітоопору, виявлені при 5 K у полях приблизно 30–40 кЕ, пов'язуються з можливим наближенням електронної системи вісмутової матриці до квантової межі. На мій погляд, така інтерпретація потребувала б додаткового прямого експериментального підтвердження, наприклад дослідження квантових осциляцій або рівнів Ландау.

4. У дисертації інтерпретація магнітотransпортних властивостей значною мірою ґрунтується на зміні рухливості носіїв заряду та співвідношення внесків електронного і діркового каналів. Водночас безпосередні вимірювання ефекту Холла, які дали б змогу незалежно оцінити концентрацію та рухливість носіїв, у роботі не наведені.

5. На жаль, у роботі не наведено результатів безпосередніх досліджень магнітних властивостей зразків. У зв'язку з цим виникає питання, як змінюється магнітна структура фази α -BiMn з температурою та чи впливає на її магнітний стан збільшення концентрації марганцю в досліджених твердих розчинах?

Наведені зауваження можна сприймати радше як побажання, які жодним чином не впливають на загальну високу оцінку роботи.

Загальний висновки.

Дисертація добре структурована і написана належною науковою мовою. Новизна та наукове значення отриманих результатів не викликають сумнівів. Опубліковані роботи повно і вірно відбивають зміст і висновки дисертаційної роботи, а також особистий внесок здобувача. Дисертаційна робота є цілісною завершеною науковою працею, що повністю відповідає заявленій спеціальності

104 «Фізика та астрономія». Отримані результати повністю відповідають заявленій меті дослідження.

Вважаю, що дисертаційна робота В. М. Ярового «Особливості поведінки магнітоопору в твердих розчинах Bi-Mn з низьким вмістом марганцю» повністю задовольняє вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженому постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. №44 зі змінами, а її автор, Валерій Михайлович Яровий, поза сумнівом, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 – «Фізика та астрономія» (галузь знань 10 – «Природничі науки»).

Офіційний опонент:

професор кафедри радіотехніки та радіoeлектронних систем факультету радіофізики, електроніки та комп'ютерних систем Київського національного університету імені Тараса Шевченка,

доктор фізико-математичних наук, професор



Леонід **ДЕХТЯРУК**

Підпис доктора фізико-математичних наук, професора

Леоніда ДЕХТЯРУКА засвідчую:

Учений секретар

Київського національного університету

імені Тараса Шевченка

кандидат філософських наук, доцент

Наталія **КАРАУЛЬНА**



Засвідчую
ПРОРЕКТОР З НАУКОВОЇ РОБОТИ
ОКСАНА ЖИЛІНСЬКА