

Відгук
офіційного опонента
професора кафедри мікро- та наноелектроніки НТУ «ХПІ»,
кандидата фізико-математичних наук,
старшого дослідника зі спеціальності «176 Мікро- та наносистемна техніка»
Мінакової Ксенії Олександрівни
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 функціональних матеріалів, електротransпортні характеристики яких істотно змінюються під дією зовнішнього магнітного поля. Особливу увагу в цьому контексті привертають тверді розчини системи Bi-Mn , у яких складна багатозонна та багатодолинна електронна структура вісмутової матриці поєднується з магнітною фазою $\alpha\text{-BiMn}$. Це створює передумови для ефективного керування процесами перенесення та розсіювання носіїв заряду за допомогою зовнішнього магнітного поля.

Водночас магнітотransпортні властивості текстурованих полікристалічних твердих розчинів Bi-Mn з вмістом марганцю до 12 ат. % залишаються недостатньо дослідженими. Тому встановлення впливу концентрації Mn, температури, величини та орієнтації магнітного поля на величину й анізотропію магнітоопору є важливим як для поглиблення уявлень про механізми електричного транспорту, так і для визначення можливостей цілеспрямованого керування властивостями таких матеріалів.

Прикладне значення дослідження пов'язане з перспективою використання матеріалів із вираженим магніторезистивним відгуком у магніточутливих резистивних елементах, датчиках і системах контролю магнітних полів, а також у спінтронних та інших функціональних електронних пристроях. Встановлені в роботі закономірності впливу концентрації Mn, температури, величини та орієнтації магнітного поля на електричний опір можуть бути корисними для вибору оптимального складу матеріалу та режимів його роботи залежно від необхідної чутливості, температурного діапазону і величини робочого магнітного поля. Виявлена анізотропія магнітоопору також може становити інтерес для створення елементів, у яких електричний відгук залежить не лише від величини, а й від напрямку зовнішнього магнітного поля. Одержані результати створюють наукові передумови для подальшого розроблення магнітокерованих резистивних компонентів, безконтактних засобів вимірювання струму, сенсорів магнітного поля, перспективних елементів спінтроніки, а також для подальшого дослідження можливостей використання таких матеріалів у квантових технологіях.

Дисертаційні дослідження виконувалися в межах відомчої теми ФТІНТ ім. Б. І. Веркіна НАН України «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.). За результатами роботи опубліковано 13 наукових праць, з них 3 статті у виданнях, що індексуються у Scopus та Web of Science, і 10 тез доповідей у матеріалах міжнародних конференцій.

Обґрунтованість і достовірність отриманих наукових результатів та сформульованих висновків забезпечуються належним рівнем постановки експериментальних досліджень, використанням сучасних і апробованих методик, застосуванням сертифікованого вимірювального обладнання та проведенням вимірювань у широких інтервалах температур і магнітних полів. Додатковим підтвердженням надійності одержаних даних є їх систематичний характер, відтворюваність, узгодженість результатів, отриманих для різних складів зразків і конфігурацій вимірювання, а також зіставлення з даними, наведеними у фаховій науковій літературі. Сукупність зазначених чинників дає підстави вважати основні результати та висновки дисертаційної роботи достатньо **обґрунтованими і достовірними**.

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** обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету та завдання дослідження, визначено його об'єкт, предмет і методичні підходи. Представлено наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, наведено відомості про особистий внесок здобувача, апробацію роботи й публікації за її тематикою.

У **першому розділі** «Структурні, магнітні та електричні властивості твердих розчинів Bi-Mn та вісмуту» узагальнено сучасні уявлення про структурні, електронні, магнітні та транспортні характеристики вісмуту і системи Bi-Mn . Розглянуто особливості багатозонної та багатодолинної електронної структури вісмуту, магнітні властивості фази $\alpha\text{-BiMn}$, а також відомі закономірності температурної та магнітопольової поведінки електричного опору для чистого вісмуту та твердих розчинів Bi-Mn . На основі аналізу літературних даних визначено коло питань, що потребують подальшого експериментального з'ясування.

Другий розділ «Отримання зразків та методи експериментальних досліджень» присвячено детальному опису підготовки об'єктів дослідження та методичного забезпечення роботи. Дисертантом детально описано процедуру одержання текстурованих полікристалічних зразків $\text{Bi}_{95,69}\text{Mn}_{3,69}\text{Fe}_{0,62}$ і $\text{Bi}_{88,08}\text{Mn}_{11,92}$ методом Бріджмена та результати їх структурно-фазового й елементного аналізу. Встановлено, що матеріали складаються переважно з

вісмутової матриці, яка містить включення магнітної фази α -BiMn. Описано підготовку зразків для транспортних вимірювань в широкому інтервалі температур для паралельної та перпендикулярної орієнтацій магнітного поля відносно транспортного струму. Розглянуто основні методики, які використовувались для електротранспортних вимірювань на змінному струмі за допомогою автоматизованої системи PPMS фірми Quantum Design та постійному струмі на спеціалізованій установці ФТІНТ ім. Б. І. Веркіна НАН України відділу мікроконтактної спектроскопії.

У третьому розділі «Температурні залежності магнітоопору твердих розчинів $\text{Bi}_{95,69}\text{Mn}_{3,69}\text{Fe}_{0,62}$ та $\text{Bi}_{88,08}\text{Mn}_{11,92}$ » проаналізовано температурну поведінку електричного опору за відсутності та в присутності зовнішнього магнітного поля. Порівняння двох складів і чистого вісмуту дало змогу простежити вплив збільшення концентрації Mn на характер електричного транспорту. Дисертантом встановлено, що без магнітного поля обидва тверді розчини демонструють металевий характер провідності, однак для $\text{Bi}_{88,08}\text{Mn}_{11,92}$ спостерігаються більш виражена нелінійність $R(T)$, особливість поблизу 70 K і квадратична температурна залежність за низьких температур.

Разом з тим показано, що магнітне поле істотно змінює форму температурних залежностей опору та спричиняє появу максимумів, положення яких зміщується до вищих температур зі зростанням поля. Для зразка з більшим вмістом Mn такі особливості спостерігаються в обох геометріях вимірювання, тоді як для $\text{Bi}_{95,69}\text{Mn}_{3,69}\text{Fe}_{0,62}$ – переважно за $\mathbf{H} \perp \mathbf{I}$. Отримані результати пов'язано зі зміною співвідношення електронного та діркового внесків, впливом фази α -BiMn і анізотропією електричного транспорту.

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 залежності магнітоопору від поля за різних фіксованих температур для конфігурацій $\mathbf{H} \perp \mathbf{I}$ та $\mathbf{H} // \mathbf{I}$. Встановлено додатний характер магнітоопору в усьому дослідженому діапазоні, а також його значну анізотропію: у поперечній геометрії величина ефекту істотно перевищує відповідні значення для поздовжньої.

Показано, що форма польових залежностей змінюється як із температурою, так і зі складом матеріалу. Для $\text{Bi}_{95,69}\text{Mn}_{3,69}\text{Fe}_{0,62}$ при 5 K виявлено максимуми поблизу 30–40 кЕ, які можуть бути пов'язані з наближенням електронної системи вісмутової матриці до квантової межі. Зі збільшенням концентрації марганцю величина магнітоопору зменшується, тоді як низькотемпературні особливості зберігаються в ширшому температурному інтервалі, що вказує на посилення впливу магнітної складової.

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 α -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.

У п'ятому розділі «Механізми формування магнітоопору в твердих розчинах $\text{Bi}_{95,69}\text{Mn}_{3,69}\text{Fe}_{0,62}$ та $\text{Bi}_{88,08}\text{Mn}_{11,92}$ » дисертантом проведено комплексний аналіз отриманих результатів. Показано, що основне перенесення заряду відбувається у Ві-матриці, тоді як фаза $\alpha\text{-BiMn}$ впливає на рухливість і розсіювання носіїв та співвідношення електронного і діркового каналів. Розглянуто роль багатозонної та багатодолинної електронної структури, текстури полікристалів, магнітної складової й можливих квантових ефектів. Запропоновано пояснення зменшення магнітоопору зі зростанням вмісту Mn та походження низькотемпературних максимумів на його польових залежностях.

У висновках узагальнено основні результати проведеного дослідження та сформульовано його ключові положення.

В цілому одержані результати розширюють уявлення про механізми магнітотранспорту в системі Ві–Mn і мають потенційне практичне значення. Результати роботи створюють наукові передумови для дослідження можливостей застосування твердих розчинів Ві–Mn у магніточутливих резистивних елементах, засобах контролю магнітних полів, безконтактних вимірювачах струму, спінтронних пристроях та окремих напрямках квантових технологій.

За змістом дисертації можна зробити такі зауваження:

1. У дисертаційній роботі показано перспективність використання твердих розчинів Ві–Mn як магніточутливих матеріалів. Водночас для оцінки можливості їх практичного застосування було б доцільно визначити такі параметри, як польова чутливість, робочий діапазон магнітних полів, ступінь лінійності магніторезистивного відгуку та температурний інтервал найбільш ефективної роботи.
2. З огляду на перспективу використання досліджених матеріалів у магніточутливих елементах було б корисно оцінити стабільність їх електротранспортних характеристик за багаторазового температурного та магнітопольового циклювання. Для практичних пристроїв важливими є не лише велика величина магнітоопору, а й відтворюваність сигналу, довготривала стабільність та відсутність істотного дрейфу параметрів.
3. Найбільші зміни магнітоопору досліджувалися в досить сильних магнітних полях. У зв'язку з цим було б доцільно чіткіше визначити, для яких саме практичних застосувань досліджені тверді розчини можуть бути найбільш перспективними: для вимірювання сильних магнітних полів, кріогенної сенсорики чи для роботи в області слабших полів і температур, близьких до кімнатної. Доцільним було б також порівняти їх основні робочі характеристики з іншими магніторезистивними матеріалами.

Висловлені зауваження мають переважно рекомендаційний характер і не впливають на загальну високу оцінку дисертаційної роботи.

Загальні висновки.

Дисертаційна робота має логічну структуру, послідовний виклад матеріалу та виконана на належному науковому рівні. Представлені результати характеризуються новизною, науковою значущістю та відповідають поставленій меті й завданням дослідження. Основні положення дисертації достатньо повно

відображені у публікаціях здобувача, які також засвідчують його особистий внесок у виконання роботи.

За своїм змістом дисертація є завершеним і цілісним науковим дослідженням та повністю відповідає спеціальності 104 «Фізика та астрономія».

Вважаю, що дисертаційна робота В. М. Ярового «Особливості поведінки магнітоопору в твердих розчинах Bi-Mn з низьким вмістом марганцю» за своїм науковим рівнем, змістом і оформленням відповідає вимогам «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, а її автор, Валерій Михайлович Яровий, заслуговує на присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 – «Фізика та астрономія» галузі знань 10 – «Природничі науки».

Офіційний опонент:

професор кафедри мікро- та наноелектроніки НТУ «ХП»,
кандидат фізико-математичних наук,
старший дослідник зі спеціальності
«176 Мікро- та наносистемна техніка



Ксенія МІНАКОВА

Підпис 
ЗАСВІДЧУЮ:
ВЧЕНИЙ СЕКРЕТАР
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"
"_____" 20____ р.

