

Голові Спеціалізованої вченої ради
ДФ 26.168.002 Інституту металофізики
ім. Г. В. Курдюмова НАН України,
член-кореспонденту НАН України,
доктору технічних наук, професору,
завідувачу відділу фізики фазових
перетворень Інституту металофізики
ім. Г. В. Курдюмова НАН України
Ковалю Юрію Миколайовичу

ВІДГУК

офіційного опонента, доктора фізико-математичних наук, професора,
завідувач кафедри загальної фізики
Київського національного університету імені Тараса Шевченка
Борового Миколи Олександровича
на дисертацію Бурлакова Віктора Олександровича на тему
«Електрофізичні властивості тонкоплівкових структур феромагнетик–
діелектрик–феромагнетик за міграції електропровідних домішок»,
подану до захисту у спеціалізовану вчену радуДФ 26.168.002
Інституту металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України
на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю
105 «Прикладна фізика та наноматеріали»

Створення сучасних систем обробки та передачі інформації вимагає розробки нових структурних елементів пам'яті, які б забезпечували суттєве зростання швидкості інформаційного обміну, щільності запису, зменшення енергозатрат при максимальній мініатюризації інформаційних пристроїв та їх довговічності. Серед напрямів пошуку таких систем на сьогодні одним з найбільш перспективних виглядає проєктування MRAM пам'яті (magnetoresistive random-access memory), яка базується на елементах з магнітним тунельним переходом. Суттєва перевага таких систем полягає у створенні спін-поляризаційного транспорту при проходженні струму в спін-інжекторній комірці, яка є гетероструктурою «феромагнетик-діелектрик-феромагнетик» (Ф-Д-Ф). Саме ці системи на сьогодні розглядаються як такі, що забезпечують оптимальне поєднання ключових експлуатаційних параметрів (час зчитування, час запису, енергонезалежність, довговічність, оновлюваність

тощо), відтак, дослідження в них процесів спінзалежного електропереносу привертають значну увагу. Тому тема дисертаційної роботи Бурлакова В.О., яка присвячена визначенню фізичних закономірностей електротранспорту в тришарових наногетероструктурах Ф-Д-Ф на основі композитів Fe/MgO/Fe, Fe/MgO/(Fe+C), Fe/MgO/Ni та Fe/MgO/Co є, безумовно, **актуальною**, а представлений матеріал наукових досліджень змістовно відповідає спеціальності 105 «Прикладна фізика та наноматеріали». Дисертаційна робота Бурлакова В.О. виконана в рамках плану науково-дослідницьких робіт, які проводяться в Інституті металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України, зокрема, в рамках її науково-дослідної тематики «Динамічні явища на поверхнях розмежування металічних матеріалів під імпульсними навантаженнями» № 050/17 за бюджетною програмою #0112U002229.

Дисертація Бурлакова В.О. «Електрофізичні властивості тонкоплівкових структур «ферромагнетик–діелектрик–ферромагнетик» за міграції електропровідних домішок» складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, переліку використаних джерел, що містить 140 найменувань. Робота представлена на 130 сторінках, містить 57 рисунків, 11 таблиць.

У вступі дисертантом обґрунтовано актуальність теми роботи, мету та завдання досліджень, визначена наукова новизна та практична цінність отриманих результатів. Визначено об'єкт і предмет дослідження та вказано методи і матеріали, що використовувалися у рамках роботи.

Перший розділ дисертації присвячено викладенню відомих літературних даних щодо сучасних систем зчитування, запису та збереження інформації, а також технології створення елементів новітніх комірок пам'яті на основі магнітного тунельного переходу. Проаналізовано можливості покращення властивостей таких систем через додавання елементу з областю негативного диференціального опору (НДО). Розглянуто теоретичне обґрунтування умов, за яких можливе створення НДО в Ф-Д-Ф композитах. Необхідно відзначити

залучення до розгляду значної кількості літературних джерел. Це дозволило автору кваліфіковано обґрунтувати та сформулювати задачі дисертаційного дослідження.

У другому розділі вказано та обґрунтовано критерії вибору матеріалів для створення Ф-Д-Ф гетероструктур, електрофізичні властивості яких досліджувалися у роботі. Детально описана методика виготовлення зразків електронно-променевим напорошенням тонких плівок металів та діелектриків на ситалову підкладку, обґрунтована обрана конструкція Ф-Д-Ф комірки. Наведено методи діагностики структури, морфології та елементного аналізу, які залучалися для характеристики отриманих зразків. Зокрема, вказані режими, за якими виконувався рентгеноструктурний аналіз напиленого заліза, сканувальна електронна мікроскопія поверхонь композитів, їх елементний аналіз. Детально описана методика реєстрації вольт-амперних характеристик (ВАХ) зразків чотиризондовим та двозондовим методами. У цілому науковий рівень матеріалу, наведеного за методикою досліджень, свідчить про високу кваліфікацію дисертанта як фізика-експериментатора.

У третьому розділі представлено результати експериментального дослідження процесів електро- та масопереносу в Ф-Д-Ф тонкоплівкових композитах на основі систем Fe/MgO/(Fe+C), Fe/MgO/Ni та Fe/MgO/Co. Встановлено, що використання різнотипних феромагнетиків як верхнього, так і нижнього шарів у Ф-Д-Ф системах дозволяє отримати область з НДО на ВАХ. Запропоновано механізм утворення НДО з використанням моделі локальних областей провідності малої площі (провідності в $1D$, $0D$ -структурах). Наведено результати експериментального дослідження електроміграції вуглецю у залізі під дією електронного вітру, на основі яких зроблено висновок, що основний внесок в транспортні процеси за умов експерименту зумовлений електричним струмом в процесі вимірювання. Виявлено вплив процесів окиснення верхнього шару металу на форму ВАХ. Зокрема, показано, що в системі Fe/MgO/Fe після

50-60 днів знаходження зразка в атмосфері за кімнатної температури з'являється асиметричність ВАХ.

Четвертий розділ присвячено викладенню результатів експериментального дослідження системи «метал-напівпровідник» для визначення впливу вуглецю на параметри зонної структури заліза за відповідних умов легування. Показано, що контактування наноплівки заліза (та заліза, легованого вуглецем) з підкладкою *p*-типу провідності супроводжується утворенням омічного контакту. У той же час, при контактуванні з підкладкою *n*-типу для наноплівки заліза також спостерігається омічний тип провідності, проте, для наноплівки заліза, легованої вуглецем, утворюється випрямляючий контакт, характерний для діода Шотткі. За ВАХ такого контакту визначено висоту потенціального бар'єра, та, відповідно, роботу виходу електронів і енергію Фермі для наноплівки заліза, легованої вуглецем. Зроблено висновок, що легування вуглецем спричиняє зміни зонних характеристик заліза, завдяки яким при дослідженні МДМ системи Fe/MgO/(Fe+C) спостерігається область з НДО на ВАХ.

Необхідно відзначити, що в дисертаційній роботі Бурлакова В.О. вдало поєднано технологічний цикл, який включає підготовку, виготовлення та атестацію зразків, з подальшими експериментальними дослідженнями їх структури, елементного складу та процесів електро- та масопереносу. Такий комплексний характер дослідження дозволив автору планувати та контролювати властивості Ф-Д-Ф та «метал-напівпровідник» комірок на етапах розробки та виготовлення, а також корегувати їх характеристики відповідно до отриманих експериментальних даних.

Застосування взаємодоповнюючих експериментальних методів дослідження (чотиризондовий та двозондовий методи вимірювання ВАХ, рентгеноструктурний аналіз, електронно-зондовий локальний мікроаналіз), зазначене вище цілеспрямоване корегування властивостей експериментальних Ф-Д-Ф та «метал-напівпровідник» комірок в процесі досліджень, залучення до

аналізу отриманих експериментальних результатів значного масиву літературних даних інших авторів, критичний аналіз власних експериментальних результатів з урахуванням джерел можливих систематичних та випадкових похибок дозволяє вважати отримані Бурлаковим В.О. експериментальні результати **достовірними**, а зроблені на їх основі висновки достатньо **обґрунтованими**. В основних твердженнях та висновках дисертації уникнуто протиріч та неузгодженості, результати окремих розділів роботи взаємно доповнюють один одного.

У результаті виконання комплексу експериментальних досліджень електрофізичних параметрів гетероструктур Ф-Д-Ф, «метал-напівпровідник» та їх комплексної інтерпретації Бурлаковим В.О. отримано ряд **нових наукових результатів**, серед яких, на мій погляд, найбільш вагомими є наступні:

- вперше експериментально встановлено існування негативного диференціального опору на вольт-амперних характеристиках тонкоплівкових систем «ферромагнетик–діелектрик–ферромагнетик» за відповідного вибору матеріалів, що використовуються як верхній та нижній метал, при наявності відмінностей в густині їх електронних станів;
- показано, що для виникнення відмінностей у зонній структурі металів системи «ферромагнетик–діелектрик–ферромагнетик», необхідних для формування області з негативним диференціальним опором, ефективним є легування одного з таких металів (а саме, легування заліза вуглецем), навіть за умови, що метали є однотипними;
- експериментально визначено зміну роботи виходу в контактах «залізо-напівпровідник *p*- та *n*-типу» за умови легування заліза вуглецем. Виявлено, що на напівпровідниковій підкладці *n*-типу (кремній, легований фосфором) легування призводить до зміни провідності із омічної, характерної для контакту чистого заліза, на таку, що є характерною для випрямляючого контакту метал–напівпровідник.

Результати досліджень, отримані у дисертаційній роботі Бурлакова В.О., розширяють і доповнюють **фундаментальні знання** про тунельні властивості гетероструктур Ф-Д-Ф та «метал-напівпровідник». **Практичне значення** отриманих результатів та **перспективність** виконаних досліджень зумовлені можливостями їх використання для покращення експлуатаційних характеристик комірок MRAM пам'яті на основі використаних гетероструктур. Зокрема, встановлений в роботі ефект зміни зонної структури системи між складовими металами шляхом легування одного з них навіть за умови однотипності металів може бути застосований для розширення пошуку можливих систем з оптимальними властивостями Ф-Д-Ф комірок, для яких характерною є наявність областей з негативним диференціальним опором.

Однак, за змістом дисертаційної роботи Бурлакова В.О. необхідно висловити ряд **зауважень**:

1. У дисертаційній роботі встановлено, що електроміграція вуглецю в об'єм прошарку заліза Ф-Д-Ф комірки призводить до поступового зникнення області НДО на ВАХ. Однак, наведене кількісне дослідження такої деградації комірок, на жаль, обмежується тільки визначенням залежності сили струму через комірку від часу, за якою визначається ефективний коефіцієнт дифузії. Зважаючи на важливість даних про перебіг деградаційних процесів при проходженні струму через легований шар заліза, варто було б визначити зміни ВАХ при циклуванні прикладеної напруги, залежність параметрів ВАХ від концентрації легуючої домішки вуглецю та товщини напорошеного шару заліза, що дозволило б оцінити межі стійкості та довговічності відповідних гетероструктур.
2. Важливим результатом роботи є запропонована модель електродифузії вуглецю, за якою ефективна міграція атомів вуглецю в напорошений шар заліза відбувається через локальні області в місцях з пониженою товщиною діелектрика, що дозволяє розглядати систему як 1D та 0D структуру. Автор оцінює перепади товщини шару діелектрика межах 3,5 -

9,5 нм при середній зареєстрованій товщині 6,5 нм. На жаль, ці дані не мають прямого експериментально підтвердження. У той же час, визначення форми рельєфу поверхні напорошеного діелектрика за такої морфології можна було б ефективно виконати методом сканувальної зондової мікроскопії – тунельної чи атомно-силової.

3. Для визначення фазового стану (аморфний чи кристалічний) напорошеного шару заліза виконувалася зйомка рентгенівських дифрактограм системи «підкладка монокристалічного кремнію – напорошений шар заліза». Однак, за наведеною на рис. 4.9 типовою дифрактограмою такої системи виникає ряд запитань: 1) Які індекси інтерференції максимума в області кутів $2\theta = 43,5^\circ - 45,0^\circ$, що ототожнюється з фазою заліза в кристалічному стані? 2) Якщо підкладка кремнію монокристалічна і на її фізичну поверхню виведена певна кристалографічна площина, то які індекси мають два інтенсивних максимуми, що спостерігаються в області кутів $2\theta = 23^\circ - 30^\circ$? 3) Яка природа протяжного та досить інтенсивного гало, що спостерігається в області кутів $2\theta = 20^\circ - 40^\circ$?
4. Для вимірювання ВАХ у системах «метал – напівпровідник – метал з домішками» використовувався двозондовий метод. Варто було б обґрунтувати доцільність його застосування для таких систем, зважаючи на можливі поляризаційні ефекти в механічних контактах при проходженні постійного струму.

Однак, важливо відзначити, що висловлені зауваження не ставлять під сумнів справедливості основних результатів та висновків роботи, а більшою мірою мають характер побажань при плануванні і виконанні подальших досліджень в цьому науковому напрямі.

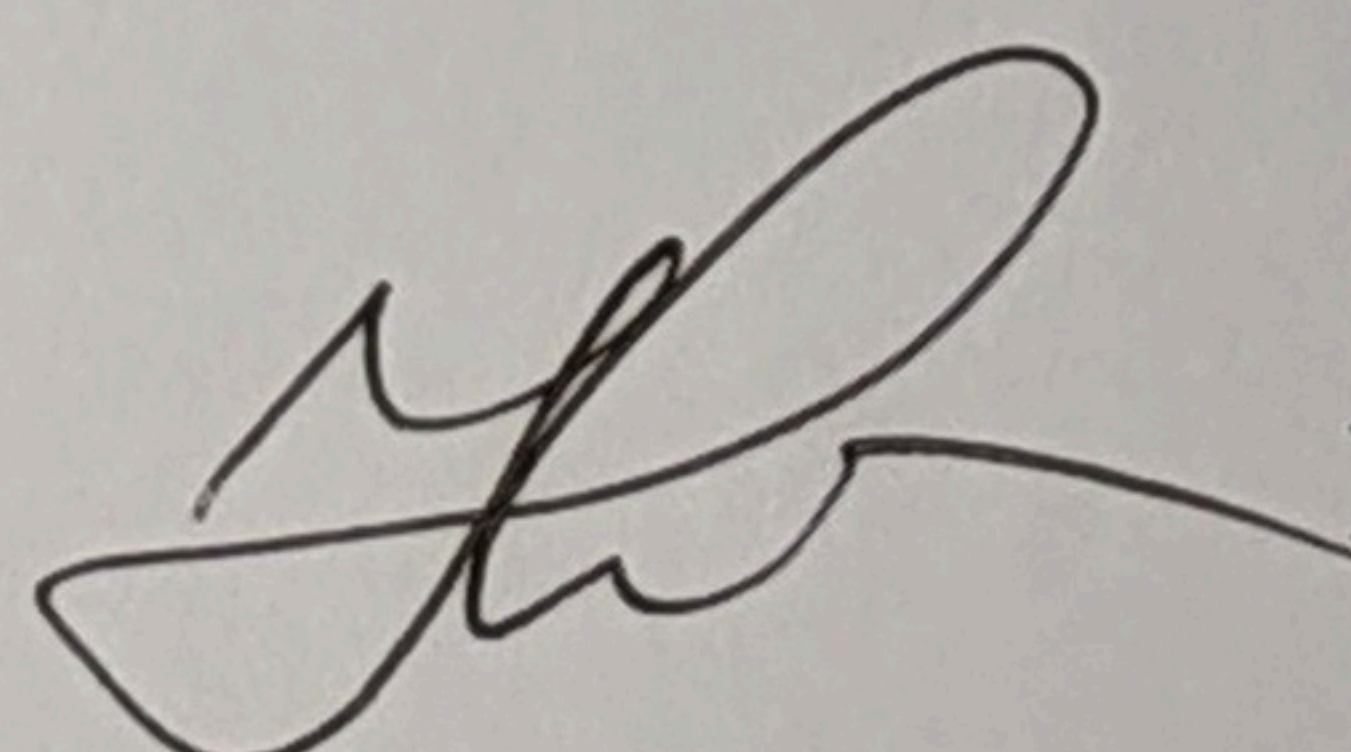
За результатами досліджень, проведених при виконанні дисертаційної роботи, автором опубліковано 3 статті у фахових рейтингових міжнародних журналах, дві з яких у журналі, що віднесено до III квартилю, а третя – у

журналі II квартилю. Результати роботи пройшли апробацію на 8 наукових всеукраїнських та міжнародних конференціях і відображені у тезах та матеріалах цих конференцій. Представлені наукові праці та автореферат, в якому визначено особистий внесок здобувача, повністю відображують зміст та висновки дисертаційної роботи. Робота написана чітко та зрозуміло.

Оцінюючи у цілому дисертаційну роботу Бурлакова Віктора Олександровича на тему «Електрофізичні властивості тонкоплівкових структур феромагнетик–діелектрик–феромагнетик за міграції електропровідних домішок», вважаю, що вона є завершеною науково-дослідною роботою, яка відповідає галузі знань 10 «Природничі науки» за спеціальністю 105 «Прикладна фізика та наноматеріали», вимогам Порядку підготовки здобувачів вищої освіти ступеня доктора філософії, затвердженого Постановою Кабінету міністрів України від 23 березня 2016 року № 261 (зі змінами і доповненнями від 03 квітня 2019 року № 283), п.10 Порядку проведення експерименту з присудження ступеня доктора філософії, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 6 березня 2019 р. № 167, а її автор – Бурлаков Віктор Олександрович, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 105 «Прикладна фізика та наноматеріали».

Офіційний опонент:

доктор фізико-математичних наук, професор,
завідувач кафедри загальної фізики
Київського національного університету
імені Тараса Шевченка

 Боровий М. О.

Підпис М. О. Борового засвідчую:



