

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,  
завідувача відділу фізики плівок  
Інституту магнетизму НАН України та МОН України  
Товстолиткіна Олександра Івановича  
на дисертацію Бурлакова Віктора Олександровича на тему  
«Електрофізичні властивості тонкоплівкових структур феромагнетик–  
діелектрик–феромагнетик за міграції електропровідних домішок»,  
подану до захисту у спеціалізовану вчену раду ДФ 26.168.002  
Інституту металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України  
на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю  
105 «Прикладна фізика та наноматеріали»**

**Актуальність теми.** Робота присвячена дослідженню тонкоплівкових систем феромагнетик–діелектрик–феромагнетик, які відносяться до класу магнітних тунельних переходів (magnetic tunnel junctions – MTJ). На сьогодні такі структури знаходять практичне застосування як елементи для збереження інформації в новому поколінні енергонезалежної магніторезистивної пам'яті з довільним доступом (magnetoresistive random access memory – MRAM). Для покращення їх характеристик необхідним є забезпечення високого показника тунельного магнітоопору (tunnel magnetoresistance – TMR) в MTJ-структурі. У сучасній спінтроніці це, як правило, досягається шляхом створення і застосування магнітних матеріалів з високими коефіцієнтами спінової поляризації. Кількість таких матеріалів досить обмежена, але, як виявилось, TMR MTJ-пристроїв можна поліпшити коригуванням їх вольт-амперної характеристики (ВАХ). Це досягали підключенням до MTJ-системи додаткового елемента, на кшталт тунельного діода, який має ВАХ з від'ємним диференціальним опором (ВДО). Проте, наявність додаткових елементів призводить до зменшення надійності електронних систем і зайвих операцій у їх виготовленні. Виключити використання додаткових елементів можна формуванням ділянки ВДО

на ВАХ самої МТJ-системи, чому і присвячені зусилля науковців провідних лабораторій світу.

Враховуючи актуальність, зрозуміло **мету** досліджень дисертаційної роботи Бурлакова Віктора Олександровича, а саме: отримати ділянку з ВДО на ВАХ, встановити закономірності зміни характеру і типу провідності в тонкоплівкових шаруватих гетероструктурах феромагнетик–діелектрик–феромагнетик і з'ясувати фізичні засади щодо отримання немонотонного характеру провідності в тонкоплівкових структурах на основі заліза.

У рамках роботи проведено дослідження таких систем як Fe/MgO/Fe, Fe/MgO/(Fe+C), Fe/MgO/Ni та Fe/MgO/Co. Робота в першу чергу має фундаментальний характер і пов'язана з дослідженням нового для МТJ-систем ефекту ВДО на ВАХ, тому вибір класичної тришарової системи з використанням типових феромагнетиків є вдалим, оскільки значно спрощує аналіз зонної будови отриманих структур для встановлення фізичних закономірностей електротранспорту. Дослідження впливу домішки на електрофізичні властивості системи Fe/MgO/Fe, коли легованим є один із шарів металу, показують, що отримати ефект ВДО на ВАХ можливо і при використанні однотипних металів в якості верхнього та нижнього шару МТJ-системи. Це принципово новий підхід, що відкриває широкий спектр подальших досліджень для пошуку оптимальних характеристик області з ВДО на ВАХ системи феромагнетик–діелектрик–феромагнетик.

**Практична цінність** результатів полягає в тому, що отриманий немонотонний тип провідності вважався характерним для напівпровідникових матеріалів. А от його реалізація в системі метал–діелектрик–метал може надати суттєвий поштовх розвитку нових підходів у сучасній функціональній електроніці. Заміна напівпровідникових елементів наносистемами, що складається з типових феромагнетиків, таких як залізо, кобальт чи нікель, може суттєво зменшити вартість приладів, що ґрунтуються на даному ефекті.

Структура дисертації Бурлакова В.О. стандартна і складається з вступу, огляду літератури, розділу про виготовлення матеріалів та методики дослідження, а також двох розділів, присвячених експериментальним результатам дослідження електрофізичних властивостей системи метал–діелектрик–метал та метал–напівпровідник. Традиційно присутні розділи з загальними висновками та переліком посилань.

Структура та виклад матеріалів в дисертації є логічним та послідовним. У літературному огляді розглянуто сучасні технології збереження інформації і наведено переваги MRAM над іншими енергонезалежними типами пам'яті. Проаналізовано механізми поліпшення властивостей базових характеристик комірок

пам'яті завдяки використанню додаткового напівпровідникового елементу, ВАХ якого містить область з ВДО. Розглянуто відомі на сьогоднішній день експериментальні результати отримання області ВДО в різноманітних наносистемах та проаналізовано можливі механізми, що є причиною утворення немонотонної ВАХ. Розглянуто теоретичні передумови та результати першопринципних розрахунків, які вказують на можливість виникнення ВДО в тонкоплівкових системах феромагнетик–діелектрик–феромагнетик за умови особливого розташування енергетичних рівнів в феромагнетику. Детально обґрунтовано вибір матеріалів, який базується на їх характеристиках та властивостях, що необхідні для отримання немонотонних ВАХ в тонкоплівкових системах. Описано методики, які використовувались в рамках дисертаційної роботи для підготовки і отримання зразків, визначення структури та хімічного складу, дослідження електрофізичних властивостей.

У третьому розділі наведено експериментальні результати отримання ділянки з ВДО на ВАХ системи метал–діелектрик–метал з використанням різних феромагнетиків у якості верхнього та нижнього металевих шарів. Для отримання немонотонної ділянки ВАХ у системі з однотипними металами запропоновано і реалізовано можливість забезпечення відмінностей зонної структури системи за умови легування одного із шарів заліза вуглецем. Проаналізовано зміну опору такої системи за постійної напруги, як результат електроміграції легуючого елементу. Продемонстровано, що випрямляючі властивості, характерні для провідності діоду Шотткі, можливо отримати для системи Fe/MgO/Fe після проходження окислювальних процесів в атмосфері за кімнатної температури.

Четвертий розділ присвячено дослідженню впливу домішки вуглецю, внесеної до наноплівки заліза, на електричні властивості системи метал – напівпровідник для експериментального встановлення особливостей зміни енергії Фермі заліза за відповідних умов легування.

#### **Основні результати та їх наукова новизна:**

1. Вперше отримано від'ємний диференційний опір в тонкоплівкових гетеро структурах феромагнетик–діелектрик–феромагнетик за умови використання металів, що відрізняються за своїми зонними властивостями.

2. Виявлено взаємозв'язок між диференційною провідністю на початковій ділянці ВАХ та напругою, за якої спостерігається область з ВДО. Такий характер провідності пов'язаний з параметрами, що відповідають за тунельні властивості системи, зокрема, з ефективною масою електрона.

3. Виникнення області з ВДО на ВАХ у системі феромагнетик–діелектрик–феромагнетик пояснено присутністю локальних областей провідності малої площі,

за якої систему можна вважати 1D чи 0D структурою, та вибором матеріалів з різною електронною густиною станів в якості верхнього та нижнього шарів.

4. На системах залізо–напівпровідник  $p$ - та  $n$ - типу провідності експериментально встановлено, що додавання вуглецю в залізо збільшує роботу виходу електронів. У результаті, це призводить до зміни провідності з омічної на випрямляючу при контакті заліза, легованого вуглецем, з напівпровідником  $n$ -типу.

**Достовірність та обґрунтованість результатів** є задовільною. У роботі представлені принципово нові результати, які в граничних випадках підтверджуються низкою експериментальних даних для різних систем і відповідають літературним даним інших авторів, тому їх достовірність не підлягає сумніву. Виявлені закономірності важливі для встановлення фізичного механізму виникнення області з ВДО на ВАХ системи метал–діелектрик–метал, а наведені в роботі фізичні обґрунтування результатів є цікавими і узгоджуються з результатами, отриманими іншими авторами за досліджень 1D- та 0D-структур.

Результати дисертаційної роботи апробовані в достатній мірі на вітчизняних та міжнародних наукових конференціях, а також на семінарах в Інституті металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України. Основні положення дисертації опубліковано в трьох статтях які індексуються наукометричною базою даних SCOPUS і відносяться до наукових видань другого та третього квартилю.

У цілому, робота справляє позитивне враження, дисертація добре написана і оформлена, структура та виклад матеріалів є логічним та послідовним, хоча трапляються пунктуаційні помилки та русизми. Серед зауважень до роботи відзначу наступні:

- 1. Перший та другий розділ частково перевантажений необов'язковою інформацією та рисунками. Частина приладів, використаних в роботі, застаріла для дослідження тонких плівок та процесів в них. Як приклад: прилад для рентгеноструктурного аналізу ДРОН-3М.*
- 2. При виборі матеріалів наголошується на перевагах кристалічного  $MgO$  у порівнянні з аморфним  $Al_2O_3$  та наводяться відповідні літературні дані. Однак, це справедливо лише для епітаксійного вирощування плівки, що не відповідає методиці напорошення, використаній в роботі. Також відсутні структурні дані, які можуть вказати, в якому стані перебуває  $MgO$ .*
- 3. Вольт-амперна характеристика, представлена на рис. 3.12 (а), має омічний характер, а не тунельний. Це також стосується і характеристик, показаних на рис. 3.19 (а) та на рис. 3.20.*
- 4. У роботі неодноразово наголошується про те, що системи, що досліджуються, є магнітними тунельними переходами та можуть використовуватися як базові елементи магніторезистивної пам'яті*

*МРАМ, однак дослідження саме магнітних властивостей цих систем у роботі відсутні.*

**5. Запропоновану фізичну модель пояснення виникнення області з ВДО на ВАХ досліджуваних систем базисно підтвердити структурними дослідженнями.**

Відмічені зауваження не впливають на обґрунтованість головних висновків та положень дисертації, а тому можуть розглядатись або як незначні зауваження з оформлення роботи (пп. 1-3), або як побажання до подальшого розвитку досліджень (пп. 4-5).

За кількістю отриманих експериментальних даних та ступенем фізичного обґрунтування отриманих результатів, фундаментальною та практичною цінністю, актуальністю та науковою новизною, цілісністю їх викладення та ступенем апробації, дисертаційна робота В.О. Бурлакова «Електрофізичні властивості тонкоплівкових структур ферромагнетик – діелектрик – ферромагнетик за міграції електропровідних до ішшк» 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 та доктора наук у закладах вищої освіти (наукових установах), 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:**

завідувач відділу фізики плівок

Інституту магнетизму НАН України та МОН України

доктор фізико-математичних наук, професор



О.І. Товстолиткін

Підпис О. І. Товстолиткіна засвідчую:

Вчений секретар

Інституту магнетизму НАН України та МОН України

кандидат фізико-математичних наук



А.О. Хребтов