

РЕЦЕНЗІЯ
на дисертацію
Полинчука Павла Юрійовича
“Безрелаксаційне перемикання комірок магнітної пам’яті на основі
багатошарових наносистем з антиферомагнітним зв’язком”,
подану на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю
104 “Фізика та астрономія”

Актуальність дослідження

Серед всього розмаїття магнітних явищ, вимушена динаміка магнітних нанооб’єктів, що знаходяться під впливом зовнішніх впливів різних видів є одним з ключових завдяки поєднанню фундаментальних і прикладних чинників. В контексті першого чинника варто згадати фізичну природу магнітних явищ та взаємодію поля та речовини. А в контексті другого – асоціацію виділеного напрямку намагніченості з бітом інформації у цифрових пристроях. Саме тому у сучасному науковому інформаційному полі спостерігається стале зростання оригінальних наукових статей, у тому числі, у топових міждисциплінарних журналах та журналах з найкращими наукометричними показниками. І це є важливою, хоч і вторинною ознакою високої актуальності теми досліджень.

Розвиток досліджень у даній галузі наразі іде двома взаємообумовленими шляхами. Перший експериментально-технологічний, в рамках якого методи виробництва магнітних нанооб’єктів вдосконалюються синхронізовано із методами вимірювань їх характеристик. Другий шлях можна умовно визначити як теоретично-числовий, що на базі добре відомих та перевірених фізичних теорій розбудовує опис нанооб’єктів з визначеними характеристиками та функціональним призначенням. Таким чином йде впевнений розвиток методології виробництва та описання властивостей нанооб’єктів та наноструктур. І в певний час розвиток набуває характеру стрибкоподібних, революційних змін, які стимулюються перспективами практичного застосування та значним потенціалом ринку за можливої комерціалізації. Саме так сталося з ідеєю магніторезистивної пам’яті MRAM, що стала об’єктом досліджень та розробок з 2005 року. Таким чином варто наголосити на синергії та позитивному зворотному зв’язку актуальності та практичної цінності завдань даної дисертаційної роботи, що не є розповсюдженим явищем у науці.

У дисертаційній роботі розбудовується модельний опис процесів перемагнічування, які пов’язані з процесом запису інформації у запам’ятовуючих пристроях типу MRAM. Динаміка намагнічування описується за допомогою рівнянь Лагранжа та Ландау-Ліфшиця-Гілберта з доданком Слончевського-Берже. Розвиваються підходи, що дозволяють аналізувати процеси

перемагнічування під дією зовнішніх полів різних конфігурацій а, також, спінопляризованого струму. Розвинута методологія не лише примножує знання про процеси перемагнічування, але й дає важливу інформацію для вдосконалення як самих пристроїв MRAM, так і процесів запису в них. І це є однозначним свідомством актуальності теми досліджень.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації

Дисертаційна робота Полинчука П.Ю. містить нові результати, достовірність яких обґрунтована використанням усталеної та апробованої методології. Зокрема, використані методи математичної фізики, теорії магнетизму та конденсованих середовищ, що є визнаним та перевіреними для вивчення структури і фізичних властивостей матеріалів. Результати та висновки теоретичних моделей, розроблених у дисертаційній роботі, узгоджуються з експериментальними даними інших авторів. Відтак, достовірність результатів досліджень, не викликає сумнівів.

Структура і зміст дисертації

Дисертація складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків, використаних джерел інформації та додатку з описом публікацій і участі у конференціях. Загальний обсяг дисертації 123 сторінок, основна частина її складає 95 сторінок, 18 рисунків, 1 таблиці, список використаних джерел включає 100 найменувань.

У вступі дисертаційної роботи обґрунтовано актуальність обраної тематики, сформульовано мету роботи та задачі дослідження, подано коротку характеристику результатів дослідження, ступінь їх апробації та публікації.

У першому розділі дисертаційної роботи викладено огляд літератури, розглянуто моделі комірок пам'яті MRAM на базі комплексних магнітних структур, зокрема, синтетичних антиферромагнітиків. Проаналізовано та систематизовано фізичні явища, покладені в основу перемикання намагніченості та перезапису елементу пам'яті.

У другому розділі дисертаційної роботи проаналізовано процеси перемикання намагніченості різними діями, зокрема зовнішніми імпульсним зовнішнім полем, що діє перпендикулярно магнітному шару, та лазерним випромінюванням та/або спінопляризованим струмом. Отримані залежності, що дозволяють оптимізувати процес запису комірки з точки зору швидкодії та енерговитратності.

У третьому розділі дисертаційної роботи вивчено комбіновану дію зовнішніх магнітних, які створюються струмо-проводами комірок пам'яті під час

протікання керуючих струмів. Розроблено методологію визначення оптимальних часових та амплітудних характеристик керуючих струмів з метою досягнення режиму швидкого перемикавання намагніченості, з яким пов'язаний процес запису інформації.

У четвертому розділі дисертаційної роботи вивчено комбіновану дію локальних зовнішніх магнітних полів і спіно-поляризованих струмів. Використовуючи модель комірки пам'яті, що складається з трьох наночарів, розділених двома тунельними магнітними переходами, розбудовано теоретичну модель перемикавання у випадку нехтування релаксаційним доданком у рівнянні Ландау-Ліфшица-Гільберта із доданком Слончевського-Берже. В рамках моделі знайдено оптимальні параметри перезапису інформації.

Нарешті, *висновки* за результатами виконання дисертаційної роботи структуровано перелічують основні результати підкреслюючи їх актуальність та новизну.

Основні наукові результати, одержані автором, та їх новизна

Основні наукові результати дисертаційної роботи оприлюднено у двох міжнародних фахових закордонних виданнях, що індексуються Web of Science та Scopus. За результатами дисертації зроблено чотири доповіді на міжнародних наукових конференціях. Ще одна стаття прийнята до друку, а її препринт викладено на сервісі ArXiv. Наукова новизна одержаних результатів може бути сформульована таким чином

1. Набула подальшого розвитку концепція швидкого перемикавання намагніченості за допомогою імпульсу зовнішнього поля, перпендикулярного до магнітної осі. Зазначена концепція реалізована для синтетичного антиферомагнітика еліптичної форми та передбачає синхронізацію обертання магнітних моментів обох шарів двошарової моделі.

2. Вперше в рамках моделі, що нехтує процесами магнітної релаксації, визначено оптимальні амплітудні, часові та поляризаційні параметри спінополяризованого стуму для швидкого та енергоефективного перемагнічування вільних шарів синтетичного антиферомагнітика.

3. Вперше в рамках моделі, що нехтує процесами магнітної релаксації, для комірки пам'яті у системі, що складається з трьох феромагнітних шарів та двох тунельних переходів між ними, розроблено методологію оптимізації перемагнічування магнітних шарів комірки за допомогою комбінованої дії імпульсного магнітного поля та поля та спіно-поляризованого струму.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертаційна робота виконана у відповідності з планами наукової діяльності відділу №03 фізики мезо- та нанокристалічних магнітних структур Інституту магнетизму НАН України та МОН України в рамках наступних тем:

- Фундаментальна НДР “Розробка фізичних основ створення матеріалів з магнітокерованими властивостями”, № держреєстрації 0121U110107 (2021-2023);
- Фундаментальна НДР “Комбіновані температурно та електрично керовані магнітні наноструктури для спінтроніки та магноніки”, № держреєстрації 0122U002260 (2022-2023);
- Грант НАН України дослідницьким лабораторіям / групам молодих вчених НАН України для проведення досліджень за пріоритетними напрямками розвитку науки і техніки №08/01-2024(5) “Керування нелінійними процесами у спінтронних наноструктурах”, № держреєстрації 0124U002047.

Практичне значення отриманих наукових результатів.

Практична цінність отриманих у дисертаційній роботі досліджень лежить у площині покращення характеристик магніторезистивної пам'яті MRAM як перспективної технології створення енергонезалежних пристроїв запису та збереження інформації. З часу виготовлення перших дослідних зразків у 2004 році технологія суттєво розвинулась та вийшла на комерційний рівень. Зокрема, такі хай-тек гіганти як TSMC (2023) та Samsung (2019) почали дрібносерійне виробництво комерційних чіпів на базі різних модифікацій цієї технології. Переваги технології MRAM полягають одночасному поєднанні наднизького енергоспоживання, високої надійності зберігання та високої швидкості запису порівняно з усіма іншими технологіями. В той самий час, всі три згадані параметри визначаються геометрією комірки пам'яті, електромагнітними характеристиками її складників та характером зовнішніх дій, що застосовуються до перемагнічування, що і являє собою фізичну основу процесу запису.

Геометрія задачі, загальні міркування та багаточисельні експериментальні та теоретичні розвідки показують, що існують широкі можливості для оптимізації процесу перемагнічування, але при цьому вкрай затребуваним є прийнятний теоретичний опис базових фізичних процесів, що відбуваються. Тому розвиток низки теоретичних моделей, окремі з яких розглядаються і в даній дисертаційній роботі, є необхідною умовою для вдосконалення пристроїв як в частині вибору функціональних матеріалів для їх виробництва, так і з точки зору напрацювання способів (зокрема, комбінованих) щодо керування намагніченістю комірок пам'яті. Отже, розвинута у даному дослідженні методологія сприяє

пошуку вірних конструкційних рішень, зберігає ресурс, здешевлює виготовлення новітніх електронних пристроїв.

Не зважаючи на відсутність або фрагментарність високотехнологічного виробництва в Україні, національний вимір практичного змісту даної дисертації все ж є відчутним. Реіндустралізація, яка йде в нашій країні з моменту повномасштабного вторгнення, і драйвером якої є оборонно-промисловий комплекс, зумовлює запит на національну елементну базу та виробництво сучасних електронних приладів та пристроїв. Останнє є можливим лише завдяки інвестиціям та співпраці із міжнародним високотехнологічними компаніями. А наявність досліджень, подібних даному, є і буде важливим фактором спрощення роботи у цьому напрямку.

Відомості про дотримання академічної доброчесності

Текст дисертації та наукові публікації Полинчука П.Ю. не містять текстових запозичень, фальсифікованих або фабрикованих даних та інших порушень академічної доброчесності.

Зауваження до дисертації

1. Модель, що використовуються для отримання результатів має низку важливих спрощень: по перше, знехтувано тепловими флуктуаціями, по друге знехтувано процесами релаксації магнітного моменту. Подібні модельні припущення є широкоживаними в теоретичній фізиці, однак у таких випадках мають бути проведені відповідні оцінки та обґрунтування. Останні присутні лише для теплових флуктуацій і лише з позицій температури фазового переходу, що є недостатнім в контексті завдань дисертації, яка присвячена, в тому числі, стабільності збереження біта інформації. Зауважу, існує формалізм для описання поведінки магнітних наночастинок як у суперпарамагнітному випадку, так і у випадку далекого від суперпарамагнітного, який тим не менш, надзвичайно важливий для врахування теплових флуктуацій.

Те ж саме стосується припущення про безрелаксаційний характер перемагнічування. Не зважаючи на наявне так зване «швидке» перемагнічування, внесок релаксаційного доданку в рівнянні Ландау-Ліфшиця-Гільберта у динаміку може бути суттєвим особливо в контексті пошуку конкретних параметрів зовнішніх впливів для перемагнічування, про що існує низка наукових робіт. Впевнений, що існує низка реальних кейсів, що допускають використання спрощеної моделі. Крім того, спрощені моделі мають методологічну цінність. Однак при цьому коректні оцінки валідності моделі є необхідним.

2. Розділ 2 є непропорційно великим, синкретичним та переобтяженим змістом. Як мінімум, він складається з двох досить різних частин. При цьому результати підрозділів 2.1, 2.2 – опубліковані в препринті з припискою, що стаття прийнята до друку, але вона формально ще не оприлюднена. Матеріал підрозділу 2.3 не опублікований взагалі. Загалом, це не порушує вимог стосовно норм оприлюднення, оскільки в доробку автора є дві наукові статті, що обліковуються базами WoS та Scopus. Однак, цей факт не дозволяє сказати, що матеріал дисертації поданий у наукових статтях повною мірою.

3. Текст дисертації все що має ознаки окремих статей та не узгоджений повною мірою як єдиний корпус інформації. Наприклад, формули (2.28) та (4.1) містять однакові частини, до яких продубльовані пояснення, при цьому коефіцієнт, що визначає вплив спін-поляризованого струму на намагніченість поданий різними позначеннями.

4. Надзвичайно мало ілюстрацій у досить цікавих з прикладної точки зору розділах 3-4. Отримані залежності містять низку параметрів, що допускає створення множини сімейств залежностей, які б набагато краще пояснювали значення отриманих результатів.

5. Висновки до розділів побіжні та формальні, в той самий час висновки до розділу 2, навпаки, має досить великий обсяг, але при цьому їх текст слабкоструктурований.

6. Надзвичайно доречно було б навести модельні формули в літературному огляді. Дисертаційна робота теоретична і вони виглядали б органічно та допомогли подолати певну синкретичність та нецілісність основного тексту дисертації.

7. Маються деякі неточності та протиріччя стосовно чутливих питань у вступі

* Особистий внесок здобувача, стор. 17, сказано «Отримані наукові результати опубліковані в 4 публікаціях», але список літератури містить посилання на видані 2 статті та 1 препринт.

* Особистий внесок здобувача, стор. 18, сказано «в публікації 8 приймав участь у виготовленні та характеристизації зразків, а також обробці експериментальних даних». Дисертаційна робота чисто теоретична, тому згадки про експеримент в особистому внеску стосовно додаткової публікації дещо веде в сторону від розуміння.

Наведені недоліки мають характер побажань для майбутніх розвідок та не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи.

