

ВІДГУК

офіційного опонента, доктора фізико-математичних наук, професора, професора кафедри загальної фізики фізико-математичного факультету Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Русакова Володимира Федоровича

на дисертаційну роботу **Полинчука Павла Юрійовича**

“Безрелаксаційне перемикавання комірок магнітної пам’яті на основі багаточарових наносистем з антиферромагнітним зв’язком”, представлену на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 – Фізика та астрономія, з галузі знань 10 – Природничі науки

Метою дисертаційної роботи П. Ю. Полинчука є визначення фізичних принципів швидкого безрелаксаційного перемикавання стану намагніченості елементів магнітної пам’яті на основі багаточарових структур з антиферромагнітним зв’язком, яка досягнута шляхом вирішення низки задач магнітної динаміки відповідних наносистем.

Актуальність теми дисертації.

У дисертаційному дослідженні П. Ю. Полинчука вивчається динаміка намагніченості елементів магнітної пам’яті під впливом зовнішнього магнітного поля та спіно-поляризованого струму. Слід відзначити, що дослідження нанорозмірних структур і матеріалів є актуальним напрямком сучасних наукових досліджень. Теоретичні та експериментальні дослідження в області фізики наноматеріалів дозволили не тільки отримати нові фундаментальні наукові знання, але й створити новий клас матеріалів, які широко застосовуються в мікроелектроніці, системах запису й обробки інформації. Існує нагальна проблема збільшення швидкодії запису інформації при використанні польового перемикавання та перемикавання з прикладанням спіно-поляризованого струму. Вивчення цих питань, підкреслює актуальність проведених у дисертації досліджень.

Ступінь обґрунтованості та достовірності результатів

Отримані у дисертації результати базуються на загальновідомих і визнаних теоріях магнітних явищ у складних магнітних системах, зокрема формалізмі Лагранжа та рівняннях Ландау–Ліфшиця і використанні методів математичної фізики. Високий ступінь достовірності результатів, представлених у дисертаційному дослідженні, підтверджується фактом їх публікації у 3 статтях у виданнях, що індексуються міжнародними наукометричними базами даних Scopus та Web of Science, та доповідями на 4 міжнародних і всеукраїнських конференціях.

Наукова новизна одержаних результатів та їх практична цінність полягає в наступному:

1. Запропоновано та досліджено низькобар'єрний режим перемагнічування синтетичного антиферомагнетика під впливом імпульсів перпендикулярного магнітного поля, що дозволяє пришвидшити процес перемагнічування у порівнянні зі звичайним прецесійним перемиканням магнітного стану.
2. Визначено оптимальну початкову орієнтацію поляризатора та необхідну величину спін-поляризованого струму для ефективного перемагнічування синтетичного антиферомагнетика.
3. Визначено умови швидкого безрелаксаційного режиму перемикання напрямку намагніченості комірки пам'яті комбінованими імпульсами магнітного поля, що дозволяє знизити густину прикладеного струму. Визначено оптимальну форму та часові параметри імпульсу магнітного поля.
4. Визначено оптимальні параметри польових (струмових) імпульсів для досягнення швидкого безрелаксаційного режиму перемагнічування комірки пам'яті у системі, що складається з трьох феромагнітних шарів та двох тунельних переходів між ними під впливом комбінованої дії імпульсів магнітного поля та спін-поляризованого струму.

Оприлюднення результатів дисертаційної роботи.

Результати дисертаційної роботи були представлені Полинчуком П.Ю. на 4 міжнародних та всеукраїнських конференціях і опубліковані у матеріалах цих конференцій. Матеріали дисертації повністю опубліковані у 3 наукових статтях у виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science та Scopus і віднесених до першого – третього квартилів (Q1-Q3) (відповідний список публікацій наведено у дисертації).

Структура дисертації.

Дисертація складається з анотації, викладеної державною та англійською мовами, вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел, та 4 додатків А-Г. Загальний обсяг дисертаційної роботи складає 123 сторінки, у т. ч. 107 сторінок основного тексту. Список використаних джерел налічує 102 найменування.

У **вступі** достатньо повно обґрунтовано вибір тематики й сформульовані цілі й завдання досліджень, показані актуальність, наукова новизна, практична цінність роботи, зазначений зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами що виконувались у відділі № 03 фізики мезо- та нанокристалічних магнітних структур Інституту магнетизму НАН України та МОН України (№ держреєстрації 0121U110107, 0122U002260,

0124U002047). Надано інформацію щодо особистого внеску здобувача, апробації результатів дисертації на наукових конференціях та їх публікації у наукових журналах.

У **першому розділі** представлено результати критичного огляду літературних джерел та проведено аналіз сучасного стану проблеми перемагнічування елементів магнітної пам'яті.

У **другому розділі** визначено умови реалізації швидкого низькобар'єрного перемагнічування напрямку намагніченості комірки пам'яті під дією імпульсу магнітного поля, прикладеного перпендикулярно до площини синтетичного антиферромагнетика. Зроблено оцінки амплітуди та тривалості імпульсів лазерного випромінювання необхідних для керування станами намагніченості САФ.

Третій розділ присвячений теоретичному дослідженню проблеми керування намагніченістю комірки пам'яті під впливом комбінованої дії локальних зовнішніх магнітних полів, які створюються при пропусканні електричного струму по струмовим шинам. Визначено оптимальні параметри польових (струмових) імпульсів для досягнення швидкого безрелаксаційного режиму перемагнічування комірки пам'яті.

У **четвертому розділі** теоретично досліджено практично важливу для спінтроники задачу – проблему керування магнітними станами комірки пам'яті під впливом комбінованої дії локальних зовнішніх магнітних полів і спін-поляризованих струмів. Аналітично визначено оптимальні амплітудні і часові параметри імпульсу спін-поляризованого струму та індукованого ним магнітного поля для досягнення стійкого, швидкого, безрелаксаційного перемагнічування комірки пам'яті.

У **висновках** сформульовано основні результати дисертаційної роботи

Критичні зауваження та побажання

1. Далеко не усі скорочення, що використовуються у роботі, наведені і розшифровані у відповідному переліку: RL, FL, ТВ, Р / AP, DMTJ і т.п. У тексті позначення фізичних величин іноді курсивом, іноді прямим шрифтом. За правилами слід подавати курсивом.

2. У тексті дисертації є деякі стилістичні неточності та друкарські помилки. Наприклад: на с. 23: «опорний (RL) –володіє вектором намагніченості» замість «має вектор намагніченості»; с 29: «по лінії слова, і лінію біту протікає електричний струм»; с. 38: маятнику Капиця Петра Леонідовича; с. 75. «З рис. 2.7 мінімум величини імпульсу спін-поляризованого струму необхідний при куті подачі становить $\alpha = \frac{3\pi}{4}$ » має бути: має місце при $\alpha = \frac{3\pi}{4}$; с. 82: похідну по часу, має бути – за часом і т.і.

3. С. 50: «Очікується, що вищезазначені вимоги не створять будь-яких значних обмежень щодо властивостей або функціонування системи на основі САФ при зміні орієнтації намагніченості». Не наведено жодних аргументів на користь такого очікування.

4. При переході від рівнянь 2.29 до 2.33 і 2.34 порушено розмірність.

5. С.84. Рис. 3.2. – що на осях?

6. С. 93-94 повтор с. 81-82:

«За прикладом робіт [76, 77], виходячи з того, що пласка форма магнітної частинки сприяє формуванню значної легкоплощинної анізотропії, вважається, що $|m_z| \ll 1$, тож, з точністю до лінійних членів по m_z , одиничний вектор намагніченості вільного шару запишемо у вигляді:

$$\mathbf{m} = \frac{M}{M_s} = (\cos\varphi, \sin\varphi, m_z) \quad (3.2)$$

У свою чергу одиничний вектор намагніченості верхнього та нижнього закріпленого шарів відповідно дорівнюють $\boldsymbol{\mu}_1 = (1, 0, 0)$, $\boldsymbol{\mu}_2 = (-1, 0, 0)$. Надалі вважається, що їх магнітні моменти запінінговано за рахунок використання прошарків з антиферомагнітної речовини. В даній схемі керування магнітними станами комірки роль зовнішніх магнітних прошарків полягає у створенні ефектів магнітоопору, які визначають напрямок намагніченості вільного магнітного шару.

Ефективне поле H_{eff}^i , яке враховує магнітостатичні внески та зовнішнє магнітне поле має вигляд:

$$\begin{aligned} H_{eff}^x &= -4\pi M_s N_x \cos\varphi + H_x \\ H_{eff}^y &= -4\pi M_s N_y \sin\varphi + H_y . \\ H_{eff}^z &= -4\pi M_s N_z m_z \end{aligned} \quad (3.3)$$

Магнітостатичні поля, що створюються верхнім та нижнім магнітними шарами компенсують одне одного».

Зроблені зауваження мають рекомендаційний характер і ніяк не знижують загальну якість дисертаційної роботи П. Ю. Полинчука.

Висновок про дисертаційну роботу.

Дисертаційна робота Полинчука Павла Юрійовича “Безрелаксаційне перемикання комірок магнітної пам’яті на основі багатшарових наносистем з антиферомагнітним зв’язком” є завершеним самостійним науковим дослідженням. Робота виконана на високому науковому рівні, не має ознак порушення принципів академічної доброчесності, отримані результати мають істотне значення для розвитку уявлень щодо динаміки намагніченості елементів магнітної пам’яті та є перспективними для застосувань у сучасних технологіях наноелектроніки та спінтроніки.

За обсягом виконаних досліджень, за актуальністю теми, новизною та обґрунтованістю наукових результатів, їх теоретичним та практичним значенням, дисертаційна робота **Полинчука Павла Юрійовича “Безрелаксаційне перемикання**

комірок магнітної пам'яті на основі багат шарових наносистем з антиферомагнітним зв'язком” відповідає вимогам до наукової кваліфікації ступеня доктора філософії, що встановлені “Порядком 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 (із змінами, внесеними згідно з Постановою Кабінету Міністрів України № 502 від 19 травня 2022 року), а здобувач ступеню – Полинчук Павло Юрійович **заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії** у галузі знань 10 – Природничі науки за спеціальністю 104 – Фізика та астрономія.

Офіційний опонент:

Доктор фіз.-мат. наук, професор,
професор кафедри загальної фізики
фізико-математичного факультету
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»

