ВІДГУК

офіційного опонента на дисертацію Вакули Артура Сергійовича «Електромагнітні властивості наномагнетиків у сантиметровому та міліметровому діапазонах довжин хвиль», яка представлена на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика

Дисертаційну роботу А. С. Вакули присвячено дослідженню магнітних резонансних властивостей нанорозмірних магнітних матеріалів, які визнано одними із найбільш перспективних матеріалів для використання в елементах сучасної електроніки та спінтроніки. Стрімкий розвиток сучасної електроніки неминуче приводить до мініатюризації елементів пристроїв і, як наслідок, до зменшення розмірів присутнього в них магнітного матеріалу. Відомо, що перехід розмірів магнітних елементів в нанорозмірну область суттєво змінює їх магнітні властивості. Останнім часом властивості нанорозмірних об'єктів інтенсивно вивчають в провідних лабораторіях світу, проте, поки залишається відкритими багато питань. У дисертаційній роботі Вакула А. С. розглянув питання, які є надзвичайно актуальними для сучасного матеріалознавства та новітніх технологій.

Серед широкого кола різних магнетиків автор виділив для вивчення наноплівки, нанодроти і наночастинки, як найбільш перспективні для практичного застосування. Магнітні та електричні властивості таких матеріалів значно залежать від їх геометричних параметрів та температури навколишнього середовища. Метою роботи було експериментально встановити закономірності впливу розмірних параметрів наномагнетиків на їх спектри феромагнітного резонансу (ФМР) в сантиметровому і міліметровому діапазонах довжин хвиль при різних температурах, а також комп'ютерне моделювання ФМР та електронного парамагнітного резонансу (ЕПР) в досліджуваних магнетиках.

У першому розділі представлено огляд існуючих наномагнетиків, потенційно цікавих для електроніки та спінтроніки. Проаналізовано їх високочастотні магнітні властивості, показані області застосування, відзначені переваги і недоліки. Наведено існуючі до цього часу результати досліджень впливу розмірних параметрів зразків на їх магнітні властивості при різних температурах.

У другому розділі автор розробив комп'ютерну модель для визначення особливостей формування ФМР в магнетиках, в тому числі, і нанорозмірних. Ця модель дає добре узгодження з експериментальними даними і може бути застосована для прогнозування магнітних резонансних властивостей різних матеріалів. Безперечним досягненням автора і одним з головних результатів роботи є модернізація експериментальної установки для вимірювання ФМР: аудіокодек комп'ютера був використаний як синхронний детектор, що дозволило на порядок збільшити чутливість установки.

У третьому розділі представлено аналіз експериментальних результатів ФМР, отриманих для різних наномагнетиків. Досліджено залежності ФМР від розмірних параметрів і температури. Наведено температурні залежності спектрів ФМР в наночастинках в діапазоні температур 77-300 K. Досліджено магнітні резонансні властивості нанодротів при температурах 4.2 K і 300 K. Проаналізовано фактори, що впливають на температурну зміну магнітних резонансних властивостей нанодротів і наночастинок.

У дисертаційній роботі отримано ряд нових наукових результатів. Серед них можна відзначити найбільш значущі:

1. Розроблено чисельну модель формування ліній ФМР і ЕПР та вперше проведено порівняльний аналіз їх формування. Показано, що лінії ФМР і ЕПР можна вважати сформованими за час, що на два порядки менше часу встановлення стаціонарного стану прецесії магнітного моменту.
2. Удосконалено методику реєстрації спектрів ФМР і ЕПР в наномагнетиках у міліметровому та сантиметровому діапазонах довжин хвиль, що дозволило:
   - спростити управляючу і вимірювальну схеми спектрометра;
   - усунути паразитні промислові шуми;
   - збільшити на порядок відношення «сигнал-шум» в спектрах ФМР/ЕПР.
3. Вперше експериментально досліджено спектри ФМР у магнітних наночастинках, які знаходяться в суспензії з багатоатомними спиртами. Показано, яким чином зміна середньої відстані між магнітними наночастинками впливає на їх поля диполь-дипольної і обмінної взаємодій.
4. Вперше експериментально встановлено механізми, відповідальні за частотний зсув лінії ФМР у масивах нанодротів різного складу зі зміною температури:
   - визначено при якій концентрації нікелю спостерігається аномальний зсув температурної залежності спектрів ФМР у масиві нанодротів з Co_xNi_{1-x};
   - показано, що основний внесок у сумарне поле магнітної анізотропії масиву нанодротів з $Fe_{0,2}Ni_{0,8}$ вносять як поля диполь-дипольної взаємодії і анізотропії форми нанодротів, так і поле зовнішніх напружень, яке залежить від температурного коефіцієнта лінійного розширення матеріалу підкладки.
5. Вперше експериментально встановлено, що ширина лінії ФМР у наночастинках Fe_3O_4, синтезованих кріохімічним методом, не змінюється в широкому діапазоні температур, на відміну від наночастинок, які синтезовані іншими методами.

Основні результати автора представлені в другому і третьому розділах дисертаційної роботи. Ці результати доповнюють знання в області теорії розповсюдження електромагнітних хвиль в магнітних середовищах, а також корисні для вирішення прикладних завдань, таких як розробка функціональних матеріалів для СВЧ-пристроїв з магнітним управлінням за умов низьких температур.

В цілому, дисертаційна робота виконана на доброму науковому рівні. Однак є ряд зауважень, на які автору слід звернути увагу:

- У Розділі 2 автор описує чисельну модель формування магнітної проникності. Однак, в Розділі 3, де описані експериментальні результати, автор цю модель не застосовує. Було б цікаво застосувати цю чисельну модель та порівняти результати з отриманими експериментальним методом.
- У Розділі 3, де досліджена залежність ширини і амплітуди резонансного поля ФМР від відстані між наночастинками, автор використовує оціночну відстань, ґрунтуючись на загальній конфігурації молекул використаних органічних речовин. На жаль, в дисертації не наведено експериментальні дані, що підтверджують відстані, відкладені на осі абсцис на рис 3.7.
- Окремі фрагменти дисертаційної роботи написані мовою, складною для розуміння. Потрібні зусилля для їх розуміння.

Ці недоліки не зменшують мою високу оцінку даної дисертації; їх можна скоріше розглядати як побажання або поради щодо майбутньої роботи.

Всі основні наукові результати автора підтверджені публікаціями в фахових наукових виданнях, згідно з вимогами МОН України до дисертаційних робіт.

Зміст дисертації в повній мірі відображено в авторефераті. Положення дисертаційної роботи повністю збігаються зі змістом автореферату.

Дисертаційна робота повністю відповідає вимогам діючого «Порядку присудження наукових ступенів», а її автор **Вакула А. С. заслуговує присудження** наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – Радіофізика.

Офіційний опонент,
доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник відділу
оптичних і магнітних властивостей
твердих тіл
Фізико-технічного інституту низьких
температур ім. Б. І. Вєркіна НАН
України О. Л. Фертман

5.10.17

Підпис Фертман О. Л. Завіряю
Вчений секретар ФТІНТ
ім. Б. І. Вєркіна НАН України О. М. Калиненко

ФІЗИКО-ТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ НИЗЬКИХ ТЕМПЕРАТУР ім. Б. І. ВЄРКІНА НАЦІОНАЛЬНОЇ АКАДЕМІЇ НАУК УКРАЇНИ
Ідентифікаційний код 03534601
УКРАЇНА, М. ХАРКІВ