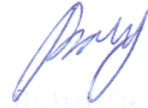


Національна академія наук України  
Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова

**ВАКУЛА АРТУР СЕРГІЙОВИЧ**



УДК 537.874:537.622

**ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ВЛАСТИВОСТІ НАНОМАГНЕТИКІВ  
У САНТИМЕТРОВОМУ ТА МІЛІМЕТРОВОМУ ДІАПАЗОНАХ  
ДОВЖИН ХВИЛЬ**

01.04.03 – радіофізика

**Автореферат**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата фізико-математичних наук

Харків – 2017

Дисертація на правах рукопису.

Роботу виконано в Інституті радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова Національної академії наук України, м. Харків.

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, професор  
член-кореспондент НАН України  
**Тарапов Сергій Іванович**,  
Інститут радіофізики та електроніки  
ім. О. Я. Усикова НАН України (м. Харків),  
завідувач відділу радіоспектроскопії.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор  
**Зависляк Ігор Володимирович**,  
Київський національний університет  
ім. Тараса Шевченка (м. Київ),  
професор кафедри квантової радіофізики;

доктор фізико-математичних наук  
**Фертман Олена Леонідівна**,  
Фізико-технічний інститут низьких температур  
ім. Б. І. Веркіна НАН України (м. Харків),  
старший науковий співробітник відділу оптичних  
і магнітних властивостей твердих тіл.

Захист відбудеться " 19 " жовтня 2017 р. о 14<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.157.01 Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України за адресою: 61085, м. Харків, вул. Акад. Проскури, 12.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України за адресою: 61085, м. Харків, вул. Акад. Проскури, 12.

Автореферат розісланий " 15 " вересня 2017 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради



І. В. Іванченко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

### **Актуальність теми**

Дисертаційну роботу присвячено експериментальному дослідженню електромагнітних властивостей наномагнетиків у сантиметровому і міліметровому діапазонах довжин хвиль. В ході роботи вивчено вплив розмірних параметрів, хімічного складу наномагнетиків і температури на спектри феромагнітного резонансу (ФМР). Крім того, на основі класичних моделей Ландау–Ліфшиця і Блоха розроблено спеціалізовану комп'ютерну програму, яка моделює лінії ФМР та електронного парамагнітного резонансу (ЕПР) в магнетиках, у тому числі нанорозмірних. Проведено порівняльний аналіз процесу еволюції ліній ФМР і ЕПР за допомогою розробленої програми.

Магнітні матеріали мають ряд цікавих і важливих властивостей, завдяки яким вони знайшли широке застосування в мікро- та наноелектроніці. Зокрема, феро- та ферімагнітні матеріали широко використовуються для створення антенно-фідерних пристроїв, НВЧ-фільтрів, відгалужувачів, циркуляторів, елементів пам'яті тощо. Мініатюризація таких елементів НВЧ-техніки неминуче приводить до зменшення розмірів магнітних матеріалів, що породжує появу наномагнетиків. Основна відмінність наномагнетиків від макроскопічних магнітних матеріалів полягає в тому, що в наномагнетиках магнітне поле поверхневої анізотропії значно впливає їх електромагнітні властивості, а саме на спектри ФМР/ЕПР. Одночасно з полем поверхневої анізотропії на спектри ФМР/ЕПР впливають поля диполь-дипольної і обмінної взаємодій. Варто відзначити вплив поля магнітопружної анізотропії, яке відіграє значну роль у спектрах ФМР при низьких температурах. Всі ці впливи обумовлюють унікальні магнітні властивості наномагнетиків. Змінюючи фізичні і хімічні параметри наномагнетиків, можна впливати на зміну зазначених полів, тим самим змінювати магнітну сприйнятливість, дисперсію і, як наслідок, спектри поглинання електромагнітних хвиль у сантиметровому і міліметровому діапазонах.

До наномагнетиків, розмірні параметри і хімічний склад яких відносно легко змінювати, слід віднести наноплівки, масиви нанодротів і наночастинки. Технології їх отримання дозволяють змінювати наступні параметри: товщину наноплівок, діаметр і міжцентрову відстань нанодротів, температуру відпалу та діаметр наночастинок. Таким чином, перспективним є вивчення наведених параметрів *масивів нанодротів, наночастинок і наноплівок*, які обумовлюють їх електромагнітні властивості, а саме частотні особливості спектрів ФМР.

**Актуальність** дисертаційної роботи полягає в необхідності дослідження впливу розмірних параметрів, хімічного складу наномагнетиків і температури на спектри ФМР.

Слід відзначити, що деякі наномагнетики, як відомо, проявляють як феромагнітні, так і парамагнітні властивості одночасно. Для таких магнетиків досить важко ввести коректне визначення терміну «спектр ФМР» або «спектр ЕПР» при реєстрації поглинання електромагнітної енергії в експерименті. Тому

терміни «ФМР» і «ЕПР» в тексті дисертаційної роботи використані як рівнозначні в залежності від типу магнітоупорядкування в наномагнетикі.

Необхідно зауважити, що для застосування наномагнетиків як елементів мікро- і наноелектроніки, які використовують ефект ФМР або ЕПР, важливо знати, яким чином у спектрах ФМР і ЕПР формуються лінії поглинання (тобто відбуваються їх еволюції) за час від моменту прикладення високочастотного поля до встановлення стаціонарної прецесії вектору намагніченості. На сьогоднішній день досить складно дослідити та порівняти еволюції ліній поглинання ФМР і ЕПР експериментально. Однак, таке дослідження і порівняння вдалося провести в дисертаційній роботі за допомогою розробленої спеціалізованої комп'ютерної програми, яка базується на чисельному методі розрахунку відомих моделей Ландау–Ліфшиця<sup>1</sup> і Блоха<sup>2</sup>. Проведене чисельне моделювання демонструє процес формування магнітної сприйнятливості феромагнетиків і парамагнетиків, та підтверджує можливість застосування їх у сучасній електроніці.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами**

Дисертаційну роботу виконано у відділах радіоспектроскопії і твердотільної електроніки ІРЕ ім. О. Я. Усикова НАН України та філіалі кафедри фізичних основ електронної техніки (ФОЕТ) Харківського національного університету радіоелектроніки (ХНУРЕ) у ІРЕ ім. О. Я. Усикова НАН України згідно з держбюджетними темами НДР: «Вивчення взаємодії електромагнітних та звукових хвиль, а також заряджених часток з твердотільними структурами» (шифр «Кентавр-5», номер держреєстрації 0112U000211, виконавець), «НВЧ - спектроскопія суспензії магнітних нанопорошків з органічними рідинами» (шифр «Рута», номер держреєстрації 0115U005233, виконавець).

### **Мета і задачі дослідження**

*Мета роботи* – встановлення залежностей спектрів ФМР у сантиметровому та міліметровому діапазонах довжин хвиль від розмірних параметрів, хімічного складу наномагнетиків і температури.

Відповідно до поставленої мети необхідно було вирішити наступні задачі:

- проведення чисельного моделювання динаміки формування ліній ФМР і ЕПР у наномагнетиках;
- модернізація схеми експериментальної установки з метою реєстрації спектру ФМР/ЕПР у наномагнетиках;
- пошук і експериментальне виявлення механізмів, які впливають на спектр ФМР у наномагнетиках.

*Об'єктом дослідження* є взаємодія електромагнітних хвиль з наномагнетиками: масивами нанодротів, наноплівками, наночастинками при температурах 4,2-300 К.

*Предметом дослідження* є магніторезонансні властивості наномагнетиків з різними розмірними параметрами і хімічним складом.

<sup>1</sup> Landau L. D. On the theory of the dispersion of magnetic / L. D. Landau, E. M. Lifshits // Phys. Zeitsch. der Sow. - 1935, - 113, 8. - P. 153-169.

<sup>2</sup> Bloch F. Nuclear induction / F. Bloch // Phys. Rev. - 1946, - 70, 7,8. - P. 460-474.

### **Методи дослідження**

Чисельне моделювання ліній ФМР і ЕПР реалізовано з використанням чисельного методу Рунге–Кутти четвертого порядку.

Експериментальне дослідження магнітних наночастинок, масивів нанодротів і наноплівок проведено за допомогою методу магніторезонансної спектроскопії в сантиметровому та міліметровому діапазонах довжин хвиль.

### **Наукова новизна одержаних результатів**

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 наночастинок, які знаходяться в суспензії з багатоатомними спиртами. Показано, яким чином зміна середньої відстані між магнітними наночастинками впливає на їх поля диполь-дипольної і обмінної взаємодії.

4. Вперше експериментально встановлено механізми, відповідальні за частотний зсув ліній ФМР у масивах нанодротів різного складу зі зміною температури:

- визначено концентрацію нікелю, при якій спостерігається аномальний зсув температурної залежності спектрів ФМР у масиві нанодротів з  $\text{Co}_x\text{Ni}_{1-x}$ ;
- показано, що основний внесок у сумарне поле магнітної анізотропії масиву нанодротів з  $\text{Fe}_{0,2}\text{Ni}_{0,8}$  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 ліній ФМР у наночастинок  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , синтезованих кріохімічним методом, не змінюється в широкому діапазоні температур, на відміну від наночастинок, які синтезовані іншими методами.

### **Практичне значення одержаних результатів**

Проведені дослідження суттєво розширюють знання про взаємодію електромагнітних хвиль з наномагнетиками та значно поглиблюють знання про вплив розмірних параметрів і хімічного складу наномагнетиків на спектр ФМР.

Розроблені й удосконалені експериментальні методики дозволили вивчити за спектрами ФМР/ЕПР магнітні властивості наномагнетиків при кімнатних та низьких температурах.

Проведені дослідження сприятимуть розробці нових типів мініатюрних високочастотних компонентів радіоелектронної техніки і дозволяють забезпечити більш надійну роботу засобів телекомунікації.

### **Особистий внесок здобувача**

Автор безпосередньо брав участь в експериментальних дослідженнях спектрів ФМР в нанорозмірних магнітних об'єктах [1-6,12-18]. Він брав участь у обробці та проведенні аналізу всіх представлених у дисертаційній роботі експериментальних даних, написанні статей, які лягли в основу даної роботи.

Автор розробив спеціалізовану комп'ютерну програму, що моделює еволюцію ліній поглинання ФМР і ЕПР із застосуванням чисельного методу Рунге–Кутти четвертого порядку [7].

Автором особисто розроблено пристрій управління електромагнітом експериментальної установки, завдяки якому збільшена точність встановлення величини магнітного поля в експерименті [8]. До особистого внеску автора слід віднести удосконалення схеми, що застосовується при дослідженні явищ ФМР/ЕПР, а саме використано аудіокодек комп'ютера як синхронний детектор. Для цього автором розроблена спеціалізована комп'ютерна програма обробки корисного сигналу, що надходить до аудіокодека комп'ютера [8-11].

### **Апробація результатів дисертації**

Результати досліджень було представлено та обговорено на наступних конференціях, форумах і симпозіумах: Symposium on physics and engineering of microwaves, millimeter and submillimeter waves (MSMW-2016), Kharkov, Ukraine, 21-24 June 2016; VIII міжнародній науковій конференції «Функциональная база нанoeлектроники», Харків, Україна, 28 вересня - 2 жовтня 2015; International Young Scientists Forum on Applied Physics (YSC-2015), Kharkov, Ukraine, 22 September - 02 October 2015; V міжнародній науковій конференції «Функциональная база нанoeлектроники», Харків-Кацивелі, Україна, 30 вересня - 5 жовтня 2012; Young Science Conference (YSC-2013), Kharkov, Ukraine, 2-6 December 2013; Symposium on physics and engineering of microwaves, millimeter and submillimeter waves (MSMW-2013), Kharkov, Ukraine, 25-27 June 2013; XVII міжнародному науковому форумі «Радиоэлектроника и молодёжь в XXI веке», Харків, Україна, 22-24 квітня 2013; XIX міжнародному науковому форумі «Радиоэлектроника и молодёжь в XXI веке», Харків, Україна, 20-22 квітня 2015; Young Scientists Conference of radiophysics, electronics, photonics and biophysics (YSC-2014), Kharkov, Ukraine, 14-17 October, 2014.

### **Публікації**

Основні результати, які увійшли до дисертації, відображені в 18 друкованих працях, з них 7 статей [1-5,7-8] у наукових журналах України, 1 стаття в науковому іноземному рецензованому журналі [6] і 10 тез у збірниках доповідей на конференціях та симпозіумах [9-18].

### **Структура та обсяг дисертації**

Дисертація складається з переліку умовних позначень, вступу, 3 розділів, висновків і списку використаних джерел. Її повний обсяг становить 134 сторінки. Дисертація містить 42 рисунка. Список використаних джерел представлено на 12 сторінках і нараховує 107 найменувань.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** наведено актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету і задачі досліджень, представлено наукову новизну, практичне значення отриманих результатів, особистий внесок здобувача, апробацію результатів роботи та кількість публікацій автора.

У **розділі 1** наведено обґрунтування вибору об'єктів дослідження. Показано, що наноплівки, масиви нанодротів і наночастинки є найбільш перспективними матеріалами для різноманітних практичних застосувань у сантиметровому та міліметровому діапазонах довжин хвиль.

Проведено аналіз впливів температури, розмірних параметрів, хімічного складу наномагнетиків на їх магнітні властивості. Досліджено вплив складу наномагнетиків на магнітні поля кристалографічної та поверхневої анізотропій, які обумовлюють вплив на спектри ФМР. Підкреслено, що на сьогоднішній день немає відомостей щодо експериментального дослідження впливу таких параметрів, як відстані між наночастинками і методу синтезу наночастинок однакового складу на спектри ФМР. Особливий інтерес становить вплив розмірних параметрів і хімічного складу на магнітні поля диполь-дипольної взаємодії між наночастинками і магнітопружної анізотропії у масивах нанодротів.

Багато джерел, у яких досліджено електромагнітні властивості магнітних масивів нанодротів, вказують на зміну спектру ФМР при варіації розмірних параметрів та геометричної конфігурації. Але на сьогодні відкритими питаннями залишаються вплив температури на спектри ФМР у масивах нанодротів з різною концентрацією кобальту та наявності підкладки в масиві нанодротів.

У **розділі 2** представлено опис теоретичної моделі для дослідження магніторезонансних властивостей наномагнетиків.

При теоретичному дослідженні магніторезонансних властивостей наномагнетиків використано відомі моделі Ландау–Ліфшиця і Блоха. На основі цих двох моделей розроблена спеціалізована комп'ютерна програма. Вона виконує моделювання динаміки вектору магнітного моменту в діапазоні магнітних полів поблизу ФМР або ЕПР. Результатом програми є графіки зміни уявної частини магнітної сприйнятливості з часом, яка пропорційна поглинанню НВЧ-хвиль, що становить ефект ФМР та ЕПР (рис. 1). Завдяки програмі визначено особливості формування ФМР і ЕПР в магнетиках, в тому числі і нанорозмірних, та проведено їх порівняльний аналіз.

Виявлено, що еволюція уявної частини магнітної сприйнятливості за моделями Блоха та Ландау–Ліфшиця відбувається за схожим сценарієм і таким чином: з часом амплітуда піку ФМР/ЕПР збільшується, а його ширина зменшується.

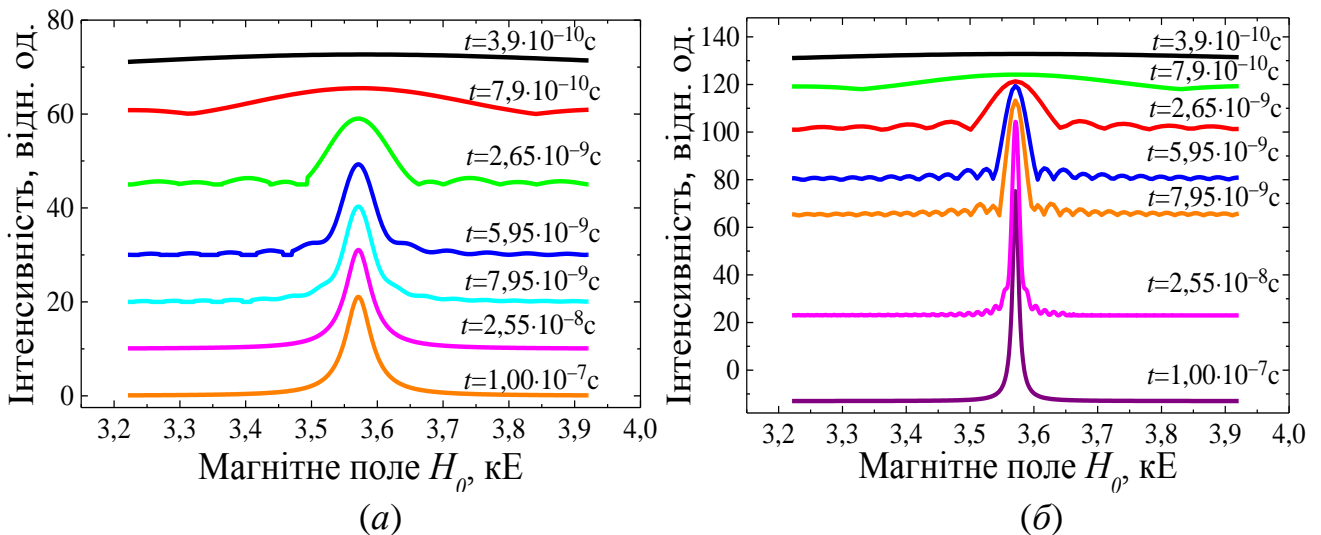


Рис. 1. Еволюція ліній ФМР та ЕПР відповідно за моделями Блоха (а) та Ландау–Ліфшиця (б) в різні моменти часу

За графіками на рис. 1 встановлено, що лінії ЕПР і ФМР можна вважати сформованими за час, який на два порядки менше часу встановлення стаціонарного стану прецесії магнітного моменту. Еволюції ліній ФМР та ЕПР, що обчислені моделями Ландау–Ліфшиця та Блоха відповідно, дозволяють виявляти високочастотні властивості наномагнетиків, які задаються магнітними властивостями матеріалу. Розроблена спеціалізована комп'ютерна програма порівняння двох моделей виявилася корисною для оцінки значень часу, за який формуються лінії ФМР і ЕПР. Цей час був прийнятий за момент, коли ширина на напіввисоті лінії поглинання ФМР і ЕПР становить 75% від її ширини лінії у випадку, коли вектор намагніченості переходить до стаціонарного стану прецесії.

Для моделювання магніторезонансних властивостей наночастинок побудована чисельна модель не враховує розподіл наночастинок за діаметром. Як наслідок в моделі форма лінії ФМР в наночастинках значно відрізняється від експериментальної. Наприклад, у випадку наночастинок, які синтезовані з розчину мікроемульсій з обробкою поверхнево-активними речовинами (ПАР) лінія ФМР має асиметричну форму [5], що пов'язано з розподілом наночастинок за діаметром у досліджених наночастинках. Обчислення спектру ФМР для кожної окремої наночастинок заданого діаметру чисельною моделлю виявилось недоцільним. Тому була розроблена інша модель, яка описана у роботі [5]. Апробацію моделі здійснено на експериментальній лінії ФМР в наночастинках  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  з ПАР *Triton X-100*. Рентгеноструктурний аналіз і електронна мікроскопія наночастинок показали, що вони мають форму близьку до сферичної. Тому для опису асиметрії вдосконалено феноменологічну модель у роботі [5], яка задає апроксимуючу функцію експериментальних графіків ліній ФМР.



У моделі лінію ФМР одиничної наночастинки описано функцією Лоренца  $I_i(H_0)$  [5]:

$$I_i(H_0) = \frac{1}{1 + \left( \frac{H_0 - H_{(res)_i}}{\Delta H_{1/2d_i}} \right)^2}, \quad (1)$$

де  $H_0$  – зовнішнє магнітне поле,  $H_{(res)_i}$  – резонансне поле кожної  $i$ -ї наночастинки,  $\Delta H_{1/2d_i}$  – ширина на напіввисоті лінії ФМР в  $i$ -й наночастинці заданого діаметру.

Логнормальний розподіл інтенсивностей піків ліній ФМР у наночастинках від їх діаметра дозволяє апроксимувати експериментальні графіки за формулою (1) в моделі. На рис. 2 наведено експериментальну (суцільна) і модельну (штрих-пунктирна) лінії ФМР.

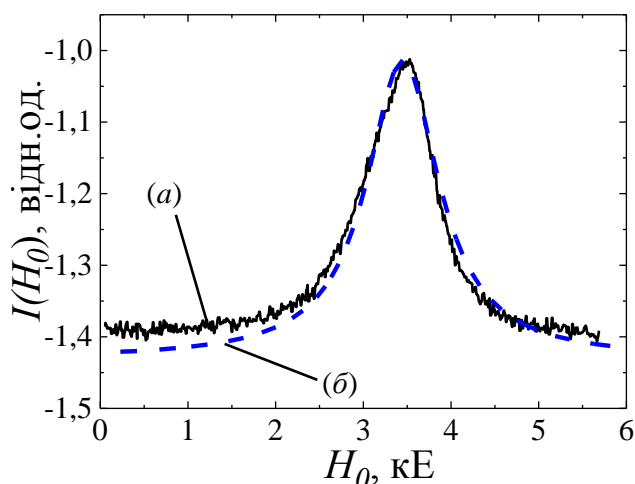


Рис. 2. Лінія ФМР у наночастинках  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  зі середнім діаметром 11 нм за умов  $T=300$  К,  $f=10,0$  ГГц: (а) експеримент та (б) моделювання

Рис. 2 показує гарний збіг експериментальних досліджень і розробленої моделі опису ФМР у наночастинках. Модель добре виконує апроксимацію невзаємодіючих частинок, якими є наночастинки у комплексі з ПАР.

Крім того, в цьому розділі наведено опис методики і техніки дослідження ФМР/ЕПР в нанорозмірних матеріалах. Проведена модернізація методики реєстрації ФМР/ЕПР для застосування у циклі експериментів, представлених в дисертаційній роботі.

Традиційною методикою дослідження ФМР/ЕПР є модуляція магнітного поля<sup>3</sup>. Однак для досліджень нанорозмірних матеріалів, де магнітного матеріалу мала кількість, потрібна наявність дуже чутливого обладнання. В експерименті часто трапляється, що шуми апаратури перевищують рівень сигналу ФМР/ЕПР. Тому вдаються до різних модифікацій і модернізацій існуючого обладнання для реєстрації ФМР/ЕПР в наномангнетиках.

<sup>3</sup> Poole C. Electron Spin Resonance: A Comprehensive Treatise on Experimental Techniques / Poole C. – New York: Dover Publications, 1997. – 810 p.

Однією із запропонованих в дисертаційній роботі модернізацій методики дослідження спектрів ФМР/ЕПР в наномагнетиках є наступна схема НВЧ-блоку експериментальної установки [8]. Вузькосмуговий підсилювач та перетворювач (або синхронний детектор) замінюється аудіокодеком комп'ютера. Таким чином, обробка сигналу здійснюється не апаратним способом, а програмним. Це виключає виникнення додаткових шумів, викликаних аналоговими схемами існуючої вимірювальної апаратури.

У вдосконаленій методиці роль генератора сигналу моделюючого поля виконує аудіокодек комп'ютера. Впровадженням аудіокодека комп'ютера в традиційну схему модуляції разом з розробленою спеціалізованою програмою обробки сигналу вдалося реалізувати такі позитивні якості вимірювальної апаратури:

- збільшено чутливість реєструючої частини спектрометра завдяки вбудованому підсилювачу аудіокодека;

- перетворення сигналу в цифровий вигляд і подальша його обробка швидким Фур'є-перетворенням дозволила виділити гармоніку корисного сигналу на заданій частоті модульованого сигналу з усього спектра частот, де були присутні шуми з різних джерел, у тому числі й промислові;

- заміна низки стандартних вимірювальних приладів одним компактним вимірювальним блоком, вбудованим у комп'ютер, привела до зменшення кількості приладів з їх внутрішніми шумами.

Виконана модернізація експериментальної установки дозволила збільшити чутливість існуючого вимірювального обладнання на порядок і надала можливість досліджувати нанорозмірні об'єкти, такі як наноплівки, масиви нанодротів і наночастинки у широкому діапазоні частот.

Розробка додаткових низькотемпературних НВЧ-модулів для спектрометрів ФМР/ЕПР дала можливість проводити температурні дослідження спектрів ФМР в діапазоні температур  $T=77-300$  К на частотах  $f=8-40$  ГГц.

У розділі 3 наведено результати досліджень спектрів ФМР, залежних від розмірних параметрів і температури наномагнетиків. Розмірними параметрами виступали товщина наноплівок  $d$  і середня відстань між наночастинками  $r$ .

У дослідженнях спектрів ФМР у наноплівках пермалою з товщиною  $d$  спостерігається зміна залежності резонансної частоти  $f_{res}$  від поля  $H_0$  (рис. 3).

Експериментальні дані спектрів ФМР у наноплівках апроксимовані відомою формулою Кіттеля<sup>4</sup>. За допомогою формули Кіттеля із залежностей частоти  $f_{res}$  від зовнішнього магнітного поля  $H_0$  (рис. 3а) у плівках пермалою з товщиною  $d=2-100$  нм визначено залежність ефективної намагніченості  $M_{eff}$ , яка у даному випадку є функцією від  $d$  (рис. 3б).

<sup>4</sup> Kittel C. On the Theory of Ferromagnetic Resonance Absorption / C. Kittel // Phys. Rev. – V. 73, – N. 2. – P.155-166.

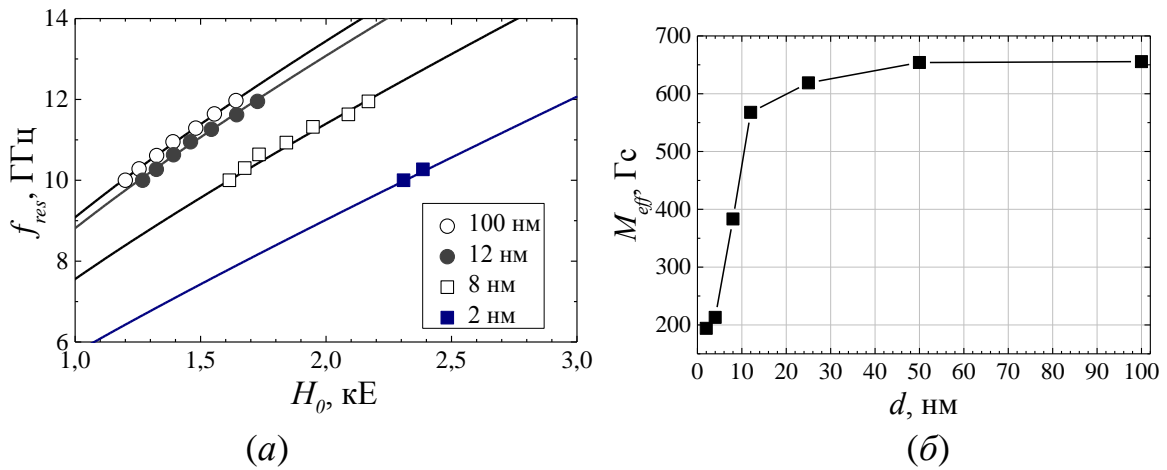


Рис. 3. Залежності (а) резонансної частоти від магнітного поля  $H_0$  (суцільні лінії – апроксимації формулою Кітеля) і (б) ефективної намагніченості насичення від товщини наноплівки пермалою

На рис. 3а помітно, що при однаковому полі  $H_0$  зі зменшенням товщини наноплівки резонансна частота  $f_{res}$  зменшується. Це обумовлено зменшенням намагніченості  $M_{eff}$  півки (рис. 3б). Така поведінка  $M_{eff}$ , насамперед, обумовлена полем поверхневої анізотропії наноплівки та її полем анізотропії форми. Обидва поля зі зменшенням товщини набувають більшого значення, у порівнянні із внутрішніми магнітними полями, що переважають в об'ємному феромагнетикі.

Дослідження залежності спектрів ФМР в наночастинках від відстані між ними  $r$  здійснено з використанням наночастинок  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (середній діаметр наночастинок  $d=11,0$  нм),  $\text{ZnFe}_2\text{O}_4$  ( $d=4,0$  нм) та  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  ( $d=4,5$  нм). Для забезпечення зміни  $r$  використані багатоатомні спирти: моно-, три- та поліетиленгліколь. За величину  $r$  прийнята довжина молекули багатоатомного спирту, яка обчислена за структурною конфігурацією.

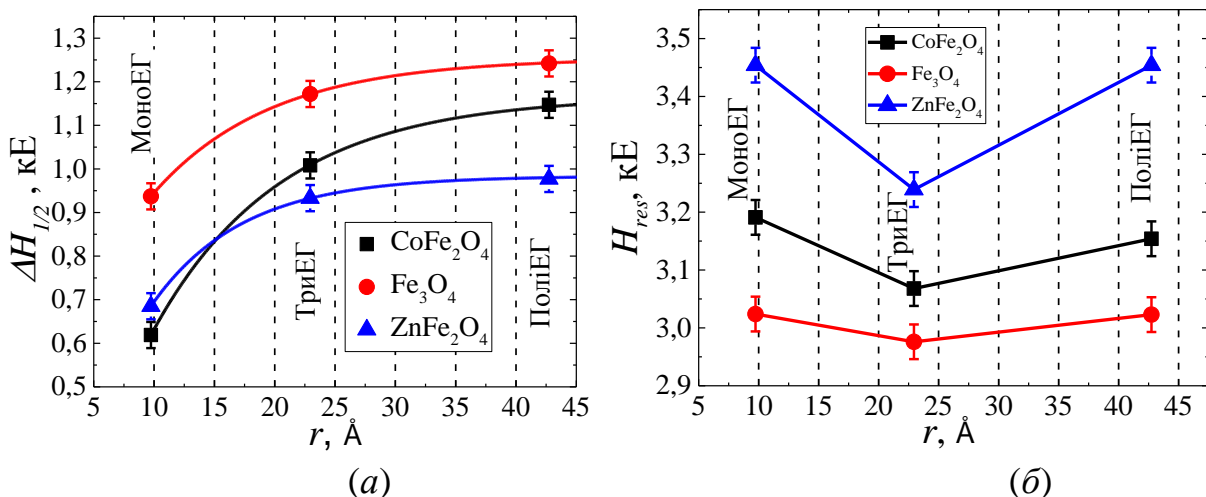


Рис. 4. Залежність ширини лінії на напіввисоті  $\Delta H_{1/2}$  (а) і резонансного магнітного поля  $H_{res}$  (б) від відстані між наночастинками в етиленгліколях (ЕГ)

Експериментально виявлено, що в досліджених наночастинках ширина лінії на напіввисоті  $\Delta H_{1/2}$  збільшується зі збільшенням  $r$  на частоті  $f_{res}$  (рис. 4а).

Показано, що в досліджуваному діапазоні параметра  $r$  поле  $H_{res}$ , як функція від  $r$ , має нелінійну залежність (рис. 4б). Аналіз результатів ряду експериментів дозволяє стверджувати, що дане явище, найбільш ймовірно, пов'язано зі зміною відносних внесків полів диполь-дипольної та обмінної взаємодій у сумарне поле магнітної анізотропії наночастинок.

Використовуючи методику реєстрації спектрів ФМР, досліджено зміну диполь-дипольної взаємодії між магнітними наночастинами за умови зв'язку їх з лігандами [12]. Дослідження наночастинок в суспензії з лігандами додатково досліджено методами спектрофотометрії (СФ) у видимій області. У роботі, як об'єкт дослідження, використано наночастинок  $Fe_3O_4$ , що синтезовано кріохімічним методом. Середній розмір наночастинок становить 11 нм. Для отримання негативного поверхневого заряду наночастинок використано електростатичний стабілізатор цитрат натрію (NaCyt). Суспензії наночастинок з концентрацією 0,1 мг/мл отримано диспергуванням в дистильованій воді або у водному розчині NaCyt на ультразвуковому диспергаторі.

Спектри ФМР у наночастинках з  $Fe_3O_4$  отримано в суспензії при додаванні у зразки еозину (Eos) і профлавіну (Pf). У суспензіях наночастинок з дистильованою водою та в водному розчині Eos виникає різниця в полі  $H_0$  піків ФМР на величину  $\delta H_a = 89$  Е (рис. 5а). Додавання Pf у суспензію з дистильованою водою не викликає змін в спектрі. Для суспензій  $Fe_3O_4$ , синтезованих з водних розчинів цитрату натрію, зміни в спектрах ФМР відбуваються лише за наявності Pf (рис. 5б). У цьому випадку пік лінії ФМР зсувається в область більших полів на  $\delta H_b = 131$  Е у порівнянні з суспензією на основі дистильованої води. Таким чином, отримані результати корелюють з даними СФ і свідчать про утворення комплексу  $Fe_3O_4$  - Eos и  $Fe_3O_4$  - NaCyt - Pf.

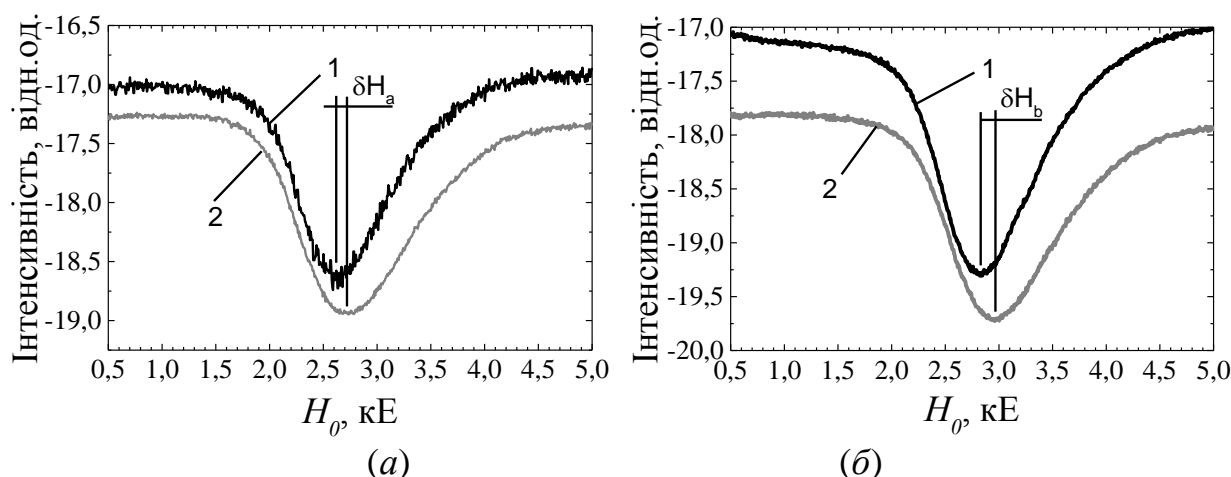


Рис. 5. Спектри ФМР наночастинок  $Fe_3O_4$  в плівках, отриманих у суспензіях  $Fe_3O_4$  в: (а) дистильованій воді (1), водному розчині Eos (2); (б) водному розчині NaCyt (1), водному розчині NaCyt - Pf (2).

Наведене на рис. 5 зміщення ліній ФМР у наночастинках означає зменшення диполь-дипольної взаємодії між ними. Це зменшення вірогідно обумовлено тим, що електростатично пов'язані з наночастинками ліганди

утворюють додаткову оболонку навколо них, що перешкоджає зближенню і агрегації наночастинок.

Дані СФ свідчать про те, що в суспензії, отриманій на основі дистильованої води, поверхневий заряд  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  є позитивним, що приводить до виникнення електростатичних взаємодій з негативно зарядженим лігандом Eos і викликає зменшення інтенсивності його спектра поглинання. Цитрат натрію змінює поверхневий заряд  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  і грає роль спейсера (відокремлює наночастинок одну від одної на фіксовану відстань), що дозволяє позитивно зарядженому Pf зв'язуватися з наночастинками. Виникнення електростатичного комплексу  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  -  $\text{NaCyt}$  - Pf приводить до падіння інтенсивності спектра поглинання Pf в СФ вимірюваннях.

Для дослідження температурних залежностей спектрів ФМР у наномагнетиках обрано масиви нанодротів  $\text{Co}_x\text{Ni}_{1-x}$  з двовимірною структурою та  $\text{Fe}_{0,2}\text{Ni}_{0,8}$  з тривимірною структурою, а також наночастинок  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  без органічних молекул (дослідження наночастинок з органічними рідинами не проводилося внаслідок неможливості контролю стану органічної молекули зі зміною температури). В масиві нанодротів з  $\text{Co}_x\text{Ni}_{1-x}$ , як двовимірної структури, досліджено зміну ФМР за умов  $T=300$  К і  $T=4,2$  К. Параметри масиву нанодротів з  $\text{Co}_x\text{Ni}_{1-x}$ , що досліджувались, наведено в табл. 1.

Табл. 1. Концентрація кобальту  $x$  і геометричні параметри зразків нанодротів з  $\text{Co}_x\text{Ni}_{1-x}$  (діаметр нанодротів  $d$  і довжина нанодротів  $L$ )

$x$	$d$ , нм	$L$ , мкм
0,9	44	12
0,78	50	21
0,64	51	14
0,56	41	15

Вигляд залежності частоти  $f_{res}$  від магнітного поля  $H_0$  за умов  $T=300$  К і  $T=4,2$  К представлено на рис. 6.

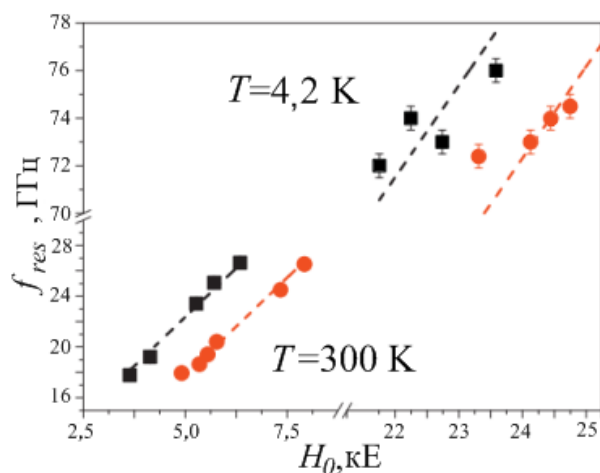


Рис. 6. Залежність резонансної частоти від зовнішнього магнітного поля в масиві нанодротів з  $\text{Co}_{0,9}\text{Ni}_{0,1}$  (■) та  $\text{Co}_{0,64}\text{Ni}_{0,36}$  (●) при  $T=300$  К і  $T=4,2$  К

Апроксимацію експериментальних точок на рис. 6 здійснено з використанням формалізму Сміта–Бельджерса<sup>5</sup>. З аналізу залежностей, представлених на рис. 6, можна зробити висновок, що зростання концентрації кобальту збільшує поле кристалографічної анізотропії. Навпаки, зі зростанням концентрації нікелю зростає поле магнітопружної анізотропії [6]. Таким чином, добір співвідношення кобальту і нікелю визначає відповідні магнітні властивості масиву нанодротів і, як наслідок, визначає характер частотного зсуву ліній ФМР зі зміною температури.

Вивчення спектрів ФМР в масиві  $\text{Fe}_{0,2}\text{Ni}_{0,8}$  нанодротів з підкладкою дозволило показати, що температурний зсув лінії ФМР залежить не тільки від матеріалів нанодротів, але й від підкладки, разом з якою масив нанодротів формує тривимірну структуру (рис. 7). Параметри нанодротів з  $\text{Fe}_{0,2}\text{Ni}_{0,8}$ , що досліджені: діаметр – 40 нм, міжцентрова відстань – 105 нм, довжина – 1 мкм.

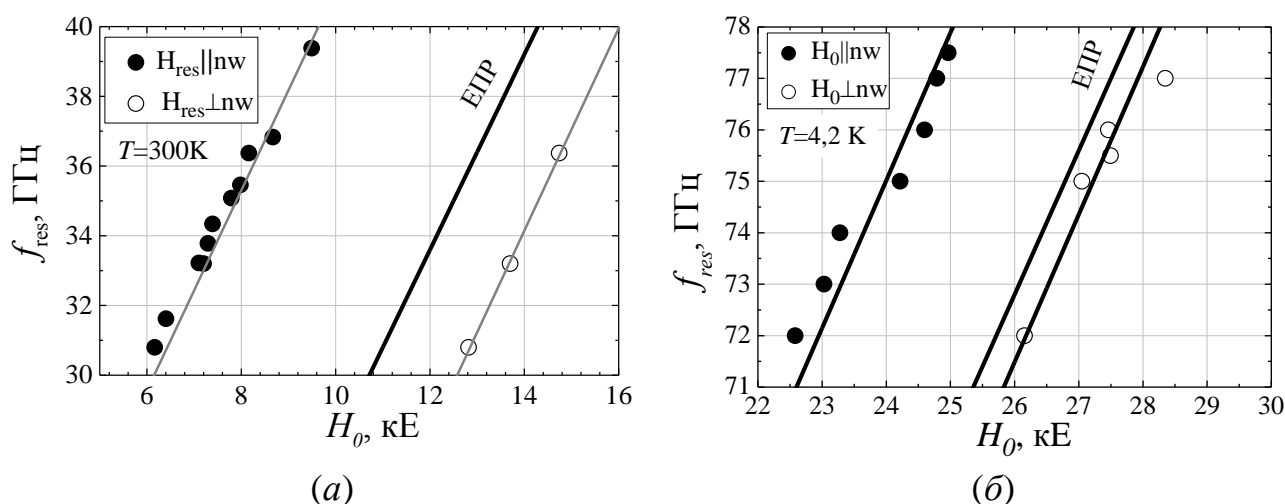


Рис. 7. Залежність резонансної частоти  $f_{res}$  від магнітного поля  $H_0$  масиву нанодротів  $\text{Fe}_{0,2}\text{Ni}_{0,8}$ :  $H_0$  спрямовано вздовж нанодротів (nw) (●) та  $H_0$  спрямовано перпендикулярно до вісі нанодротів (○) при температурах: (а)  $T=300$  К, (б)  $T=4,2$  К

З рис.7 видно, що у разі, коли зовнішнє магнітне поле прикладено перпендикулярно до вісі нанодротів, лінії ФМР в досліджуваному зразку виявляються зсунутими в область менших частот при  $T=4,2$  К у порівнянні з розрахунками, де коефіцієнт розширення матеріалу підкладки не враховується.

Для дослідження температурної залежності спектрів ФМР в наночастинках одного складу обрані наночастинки  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Їх короткі характеристики наведено в табл. 2. Детально методику дослідження спектрів ФМР в наночастинках  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  наведено у роботі [3].

<sup>5</sup> Вонсовский С. В. Ферромагнитный резонанс / Вонсовский С. В. –М.: Физматлит, 1961. - 343 с.

Табл. 2. Характеристики досліджених наночастинок  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 

Зразок	Метод синтезу	Середній діаметр, нм
№ 1 ( <i>DEG</i> )	Осадження з діетиленгліколю при температурі 200°C	6
№ 2 ( <i>Triton</i> )	Осадження в мікроемульсіях з використанням ПАР <i>Triton X-100</i>	11
№ 3 ( <i>Cryo</i> )	Отримання кріохімічним синтезом	11
№ 4 ( <i>Argon</i> )	Осадження з діетиленгліколю з подальшою термообробкою в аргоні при $T=500^\circ\text{C}$	25

Графік експериментальних спектрів ФМР в залежності від величини поля  $H_0$  для зразка № 2 (*Triton*) наведено на рис. 8а. Аналогічні залежності демонструють зразки № 1, 3, 4. Слід зазначити, однак, що в усіх зразках при однакових величинах поля  $H_0$  і при  $T=300$  К значення  $f_{res}$  відрізнялись (рис. 8б).

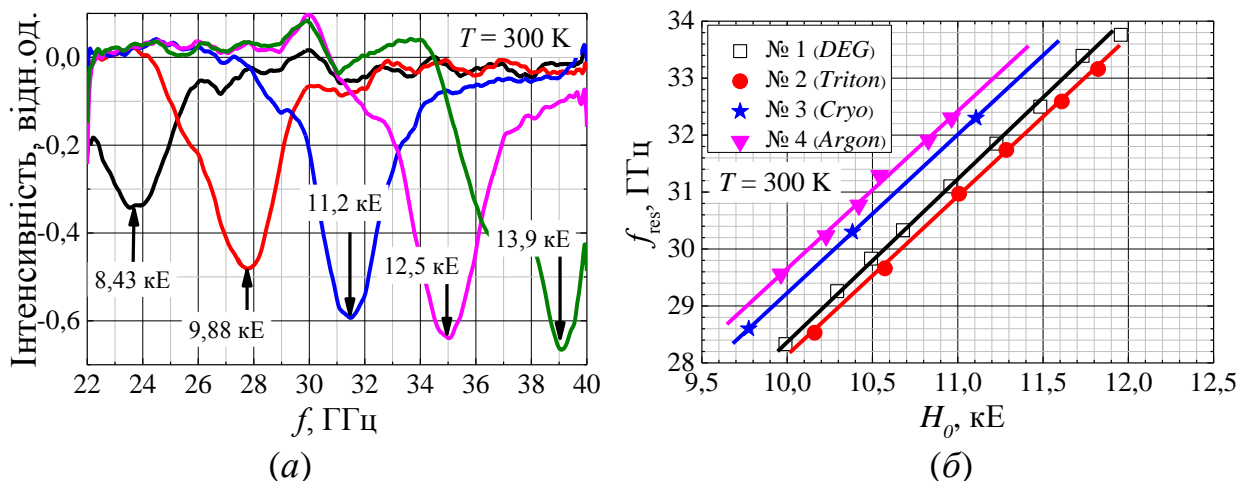


Рис. 8. Результати дослідження спектрів ФМР у наночастинках  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ : (а) експериментальні графіки спектрів ФМР у зразку № 2 (*Triton*) і (б) залежність резонансної частоти  $f_{res}$  від магнітного поля  $H_0$  зразків, що досліджувались

Як видно з рис. 8б, збільшення діаметра наночастинок приводить до збільшення частоти  $f_{res}$  при однакових значеннях  $H_0$ . Це свідчить про збільшення сумарного поля магнітної анізотропії  $H_a$  зразка. Незважаючи на практично однаковий розмір наночастинок № 2 (*Triton*) і № 3 (*Cryo*), величина поля  $H_a$  у них істотно відрізняється. Це пов'язано з особливостями методу синтезу наночастинок № 2. Речовина *Triton X-100* в зразку № 2 також, як і багатоатомні спирти і ліганди, створює навколо наночастинок оболонки, збільшуючи відстані між ними, що значно зменшує поле диполь-дипольної взаємодії між наночастинками.

Дослідження при  $T=77-300$  К зміни спектрів ФМР в наночастинках  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , які синтезовані різними методами, було проведено в полі  $H_0=10,5$  кЕ для

виконання умови, щоб резонансний пік перебував в досліджуваному діапазоні частот  $f=22-40$  ГГц. Охолодження зразка було здійснено при  $H_0=0$  Е. За результатами експерименту побудовані графіки залежності частоти  $f_{res}$  (рис. 9а) і ширини лінії на напіввисоті  $\Delta H_{1/2}=(\Delta f_{res1/2})/\gamma$  (рис. 9б) від температури.

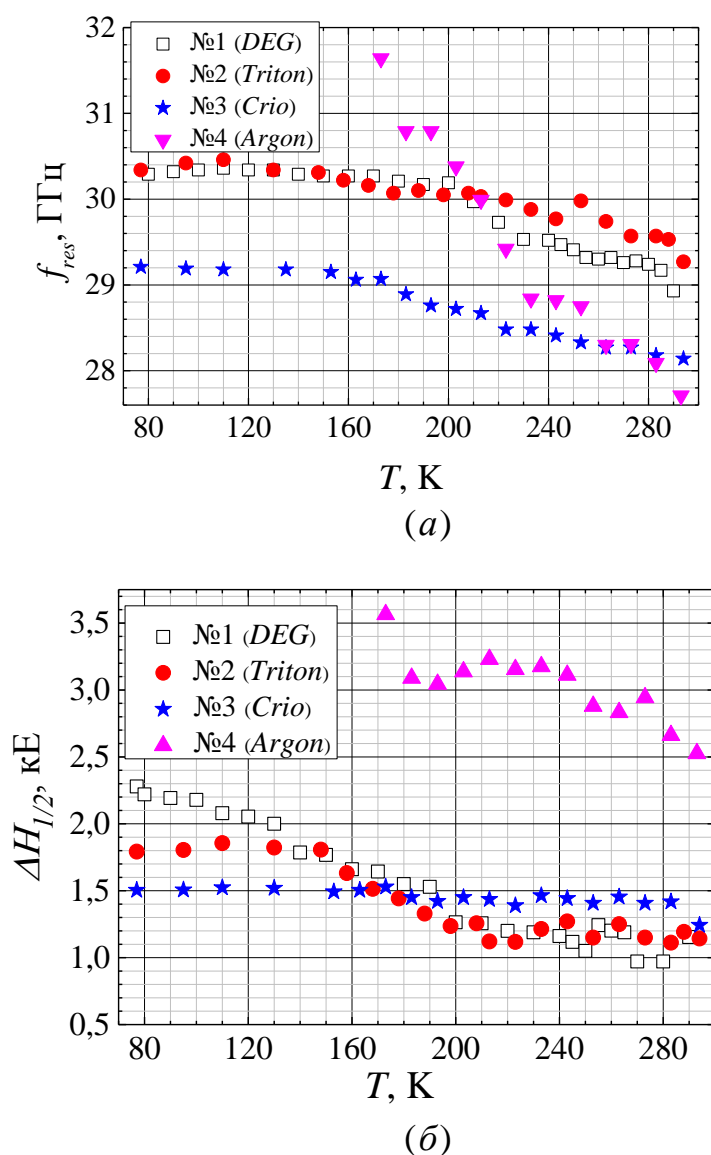


Рис. 9. Залежність резонансної частоти  $f_{res}$  (а) та ширини резонансної лінії на напіввисоті  $\Delta H_{1/2}$  (б) від температури для наночастинок Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>

На рис. 9а помітна відмінність у частотах  $f_{res}$  зразків. Значна відмінність спостерігається між ширинами ліній  $\Delta H_{1/2}$  зразків. Знайдено, що ширина піку ФМР у наночастинках, синтезованих кріохімічним методом, не залежить від температури на відміну від наночастинок, синтезованих іншими методами. Даний ефект, за припущенням, пов'язаний з тим, що синтез кріохімічним методом відбувається при низьких температурах, що, найімовірніше, впливає на поле зовнішніх напружень матеріалу наночастинок.



## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальну задачу з визначення в широкому діапазоні температур особливостей спектрів ФМР в перспективних для мікро- і наноелектроніки наномагнетиках. Визначено вплив розмірних параметрів, хімічного складу наномагнетиків і температури на спектри ФМР.

Здійснено чисельне моделювання ліній поглинання ФМР і ЕПР, та проведено їх порівняльний аналіз за допомогою розробленої спеціалізованої комп'ютерної програми. Вперше показано, що лінію поглинання ФМР і ЕПР можна вважати сформованою за час, який на два порядки менший часу встановлення стаціонарного стану прецесії магнітного моменту.

Для експериментальних досліджень наномагнетиків здійснено модернізацію методики реєстрації ФМР/ЕПР. Вперше в схемі модуляції магнітного поля як синхродетектор впроваджено аудіокодек комп'ютера. Розроблено спеціалізовану програму, яка обробляє корисний сигнал, що надходить на аудіокодек. Таке впровадження дозволило збільшити чутливість реєструючої апаратури на порядок. Оцифровка виміряного сигналу і його подальше швидке Фур'є-перетворення дали можливість усунути паразитні шуми. Така модернізація дозволила замінити ряд стандартних вимірювальних пристроїв одним компактним блоком.

Експериментально досліджено залежність спектрів ФМР від розмірних параметрів і температури за допомогою модернізованої методики реєстрації. Було вивчено вплив розмірних параметрів, а саме товщини наноплівки пермалою і відстані між наночастинками  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  на спектри ФМР. Визначено, що зі зменшенням товщини наноплівки пермалою при рівних значеннях зовнішнього магнітного поля пік резонансу зсувається в область менших частот. Зміна резонансної частоти, як функції від товщини плівки, наочно демонструє перехід від магнітних властивостей об'ємного (тривимірного) матеріалу до магнітних властивостей двовимірного матеріалу при зменшенні товщини наноплівки.

Дослідження спектрів ФМР в наночастинках у суспензії з багатоатомними спиртами показало, що ширина лінії збільшується з відстанню між наночастинками. Виявлено, що резонансне поле, як функція відстані між наночастинками, носить нелінійний характер в досліджуваному діапазоні відстаней. Показано, що найбільш імовірною причиною такого ефекту є зміна відносних внесків полів диполь-дипольної взаємодії, поверхневої анізотропії та обмінної взаємодії в сумарне поле магнітної анізотропії наночастинок.

Дослідження масивів нанодротів з  $\text{Co}_x\text{Ni}_{1-x}$  як двовимірної структури дозволило визначити умову, за якої величина сумарного поля магнітної анізотропії нанодротів збільшується зі зменшенням температури. В результаті, резонансні піки ФМР зсуваються в область менших частот. Навпаки, для концентрації кобальту  $x=0,64$  ( $\text{Co}_{0,64}\text{Ni}_{0,36}$ ), резонансні піки ФМР зсуваються в область більших частот, що викликано взаємним внеском в сумарне поле

магнітної анізотропії полів кристалографічної анізотропії та магнітопружної анізотропії.

Знайдено, що температурна залежність сумарного поля магнітної анізотропії масиву нанодротів з  $\text{Fe}_{0,2}\text{Ni}_{0,8}$  при наявності підкладки визначається не тільки коефіцієнтами розширення матеріалів нанодротів, але й коефіцієнтом розширення підкладки, на якій вони були вирощені. Даний висновок підтверджено експериментами при  $T = 4,2$  К, де лінії ФМР у досліджуваному зразку виявляються зсунутими в область менших частот в порівнянні з розрахунковими значеннями для масиву нанодротів з  $\text{Fe}_{0,2}\text{Ni}_{0,8}$  без підкладки.

Вперше показано, що ширина лінії ФМР у наночастинках  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , синтезованих кріохімічним методом, не змінюється в широкому діапазоні температур. Найбільш імовірною причиною цього ефекту є компенсація внесків полів магнітопружної анізотропії наночастинки та диполь-дипольної взаємодії між наночастинками.

### СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Вакула А. С. Исследование эффективной намагниченности насыщения наноразмерных плёнок пермаллоя методом сверхвысокочастотного ферромагнитного резонанса / А. С. Вакула, С. В. Недух, С. И. Тарапов, С. Ю. Полевой, А. А. Харченко // Радиотехника. – 2013. – Т. 175. – С. 78-91.

2. Вакула А. С. Ферромагнитный резонанс в гексагональном массиве нанопроволок из пермаллоя в нанопорах оксида алюминия с подложкой из алюминия / А. С. Вакула // Радиотехника. – 2014. – Т. 178. – С. 67-70.

3. Вакула А. С. Температурное изменение в СВЧ-диапазоне магнитных свойств нанопорошков  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , синтезированных разными методами / А. С. Вакула // Радиофизика и электроника. – 2015. – Вып. 3. – С. 62-65.

4. Anders A. G. Microwave spectra of  $\text{ZnFe}_2\text{O}_4$ ,  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  and  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  nanoparticles suspended with mono-, Tri-, polyethylene glycol / A. G. Anders, A. S. Vakula, S. I. Tarapov, E.A. Belous // Telecommunications and Radio Engineering. – 2016. – V. 75, N. 20. – P. 1849-1855.

5. Kalmykova T. Simulation of the electron spin resonance peak shape for magnetic nanopowder formed by particles of different diameters / T. Kalmykova, A. Vakula, S. Nedukh, S. Tarapov, A. Belous, O. Yelenich // Functional materials. – 2016. – V. 23, N. 4. – P. 618-623.

6. Moskaltsova A. Study of magnetoelastic and magnetocrystalline anisotropies in  $\text{Co}_x\text{Ni}_{1-x}$  nanowire arrays / A. Moskaltsova, M. P. Proenca, S. V. Nedukh, C. T. Sousa, A. S. Vakula, G. N. Kakazei, S. I. Tarapov, J. P. Araujo // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2015. – V. 374. – P. 663-668.

7. Вакула А. С. Эволюция линии поглощения электронного магнитного резонанса / А. С. Вакула, С. В. Недух, С. И. Тарапов // Радиотехника. – 2014. – Т. 177. – С. 105-108.

8. Вакула А. С. Комплекс для исследования наноразмерных магнетиков методом сверхвысокочастотного электронного парамагнитного резонанса /

А. С. Вакула, С. В. Недух, С. И. Тарапов, С. Ю. Полевой // Радиотехника. – 2014. – Т. 176. – С. 187-190.

9. Вакула А. С. Программная реализация статистического усреднения экспериментальных спектров электронного парамагнитного резонанса /А. С. Вакула, С. Ю. Полевой // 17-й міжнародний молодіжний форум "Радиоэлектроника и молодёжь в XXI веке" : міжнар. форум. 22-24 квітня 2013 : матеріали форуму. – Х., 2013. – Т.1. – С. 271-272.

10. Vakula A. S. Technique for electron spin resonance registration based on audio card synchrodetector / A. S. Vakula, S. Y. Polevoy // International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves, Workshop on Terahertz Technologies and Radiospectroscopy of Complex Media, Workshop on Complex Conductivity and Wave Symmetry of Fe-Based Superconductors : int. symp., 29-28 June 2013 : symp. proc. – Kharkiv, Ukraine, 2013. – WT-22.

11. Vakula A. Improvement of electron spin resonance technique by the scanning resonant frequencies method / A. Vakula, A. Varavin, A. Vasilyev // 14 International Young Scientists Conference on radiophysics, electronics, photonics and biophysics : int. conf., 14-17 October 2014 : conf. proc. – Kharkiv, Ukraine, 2014. – SSR&NM-15.

12. Vakula A. Spectral Investigation of Magnetite Nanoparticles Interaction with Charged Drugs / A. Vakula, E. Bereznyak, N. Gladkovskaya [et al.] // 9th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves: int. symp., 21-24 June 2016 : symp. proc. – Kharkiv, Ukraine, 2016. – A-31.

13. Kalmykova T. Simulation of the Electron Magnetic Resonance Peak Shape for Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> Nanopowder / T. Kalmykova, A. Vakula, S. Nedukh [et al.] // 9th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves: int. symp., 21-24 June 2016 : symp. proc. – Kharkiv, Ukraine, 2016. – E-17.

14. Калмыкова Т. В. Форма линии магнитного резонанса в нанопорошке, свормированной сферическими гранулами /Т. В. Калмыкова, А. С. Вакула, С. В. Недух [и др.] // 8-а міжнародна наукова конференція "Функциональная база наноэлектроники" : міжнар. конф. 28 сентября-2 октября 2015 : матеріали конференції. – Х., 2015. – С. 35-37.

15. Vakula A. Magneto-resonance study of Co-Ni nanowires array / A. Vakula, A. Moskaltsova, T. Kalmykova [et al.] // International Young Scientists Forum on Applied Physics : int. forum., 22 September-02 October 2015: forum proc. – Kharkiv, Ukraine, 2015. – MMM-8.

16. Вакула А. С. Угловая зависимость спектров ФМР одномерных магнетных кристаллов в СВЧ диапазоне /А. С. Вакула, С. И. Тарапов // 5 міжнародна наукова конференція "Функциональная база наноэлектроники" : міжнар. конф. 30 вересень-5 жовтень 2012 : матеріали конф. – Х.-Кацивелі, 2012. – С. 85-88.

17. Vakula A. S. Ferromagnetic resonance at the temperature 4.2 K in the array of Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub> nanowires localized in nanopores alumina / A. S. Vakula, Y. S. Polevoy,

S. V. Nedukh // 13-th Kharkiv Young Scientists Conference on Radiophysics, Electronics, Photonics and Biophysics : int. conf., 2-6 December 2013 : conf. proc. – Kharkov, Ukraine, 2013. – SSR&NM-12.

18. Вакула А. С. СВЧ ферромагнітний резонанс в нанопорошках  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  / А. С. Вакула, Б. В. Чернишов // 19-й міжнародний молодіжний форум "Радиоелектроника и молодёжь в XXI веке" : міжнар. форум. 20-22 квітня 2015 : матеріали форуму. – Х., 2015. – Т.1. – С. 11-12.

### Анотація

**Вакула А. С. Електромагнітні властивості наномагнетиків у сантиметровому та міліметровому діапазонах довжин хвиль.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика. – Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України, м. Харків, 2017.

У дисертаційній роботі вирішено актуальну задачу з визначення в широкому діапазоні температур особливостей ферромагнітного резонансу (ФМР) в перспективних для мікро- і наноелектроніки наномагнетиках. Визначено вплив розмірних параметрів, хімічного складу наномагнетиків і температури на спектри ФМР.

Показано та проаналізовано залежність магніторезонансних властивостей наномагнетиків від їх розмірних параметрів, хімічного складу і температури. Дослідження, що проведені в дисертаційній роботі, допоможуть у створенні нових нанорозмірних магнітних матеріалів і розробці на їх основі перспективних компактних пристроїв мікро- та наноелектроніки.

Розроблено чисельну модель формування ліній поглинання ФМР і електронного парамагнітного резонансу (ЕПР). Вперше показано, що лінію поглинання ФМР і ЕПР можна вважати сформованою за час, який на два порядки меншим часу встановлення стаціонарного стану прецесії магнітного моменту. Удосконалено методику ЕПР-спектроскопії нанорозмірних об'єктів у міліметровому і сантиметровому діапазонах довжин хвиль. Вперше експериментально досліджено ФМР у магнітних наночастинках у суспензії з багатоатомними спиртами. Показано, яким чином зміна середньої відстані між магнітними наночастинками впливає на їх поля диполь-дипольної і обмінної взаємодій. Вперше експериментально встановлені механізми, відповідальні за частотний зсув піка ФМР у масивах нанодротів різного складу зі зміною температури. Вперше виявлено, що ширина лінії ФМР в наночастинках  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , синтезованих кріохімічним методом, не змінюється в широкому діапазоні температур, на відміну від наночастинок  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , які синтезовані іншими методами.

**Ключові слова:** наномагнетик, ферромагнітний резонанс, електронний парамагнітний резонанс, магнітні властивості, низькі температури, міліметрові та сантиметрові хвилі.

### Аннотация

#### **Вакула А. С. Электромагнитные свойства наномагнетиков в сантиметровом и миллиметровом диапазонах длин волн.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – радиофизика. – Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины, г. Харьков, 2017.

В диссертационной работе решена актуальная задача по определению в широком диапазоне температур особенностей спектров ферромагнитного резонанса (ФМР) в перспективных для микро- и наноэлектроники наномагнетиках. Определено влияние размерных параметров, химического состава наномагнетиков и температуры на спектры ФМР.

Представлены магниторезонансные свойства наномагнетиков в зависимости от изменения их размерных параметров, химического состава и температуры. Исследования, проведенные в диссертационной работе, помогут в создании новых наноразмерных магнитных материалов и разработке на их основе новых перспективных компактных устройств микро- и наноэлектроники.

Разработана численная модель формирования линий поглощения ФМР и электронного парамагнитного резонанса (ЭПР). Впервые показано, что линии поглощения ФМР и ЭПР можно считать сформированными за время, которое на два порядка меньше времени установления стационарного состояния прецессии магнитного момента. Усовершенствована методика ЭПР-спектроскопии наноразмерных объектов в миллиметровом и сантиметровом диапазонах длин волн. Впервые экспериментально исследованы спектры ФМР в магнитных наночастицах в суспензии с многоатомными спиртами. Показано, каким образом изменение среднего расстояния между магнитными наночастицами влияет на их поля диполь-дипольного и обменного взаимодействий. Впервые экспериментально установлены механизмы, ответственные за частотный сдвиг ФМР в массивах нанопроволок различного состава с изменением температуры. Впервые найдено, что ширина линии ФМР в ансамбле наночастиц  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , синтезированных криохимическим методом, не меняется в широком диапазоне температур, в отличие от наночастиц  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , которые синтезированы другими методами.

**Ключевые слова:** наномагнетик, ферромагнитный резонанс, электронный парамагнитный резонанс, магнитные свойства, низкие температуры, миллиметровые и сантиметровые волны.

### Abstract

#### **Vakula A. S. The electromagnetic properties of nanomagnets in the centimeter and the millimeter wavebands. – On the manuscript.**

Thesis for a candidate degree in physics and mathematics by speciality 01.04.03 – radiophysics. – O. Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of the NAS of Ukraine, Kharkiv, 2017.

In this Thesis the actual task of study the ferromagnetic resonance (FMR) features for micro- and nanoelectronics nanoscale objects having different geometrical configurations in a wide temperature range has been solved.

The dependence of the magnetic resonance properties of nanomagnets on their geometric parameters, chemical composition and temperature is revealed and analyzed. The research carried out is useful for the development of new nanoscale magnetic materials and the design on their base a new generation of compact devices of micro- and nanoelectronics.

A numerical model of the formation of the FMR and Electron Spin/Paramagnetic Resonance (ESR/EPR) absorption peaks has been developed. It is show for the first time that the absorption FMR and ESR-peaks can be considered as formed for the time that is of two orders less that the time which is required for establishing the stationary precession of the magnetic moment. The ESR spectroscopy of nanomagnets in the millimeter and centimeter wavelengths band has been improved. For the first time, FMR in magnetic nanoparticles in suspension with polyhydric alcohols have been experimentally investigated. It is shown in which way the variation of the average distance between magnetic nanoparticles affects their fields of dipole-dipole and exchange interactions. For the first time, the mechanisms responsible for the FMR frequency shift for arrays of nanowires having various compositions with temperature change have been experimentally established. It was found in the first time that the width of the FMR-peak for  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  nanoparticles synthesized by the cryochemical method does not change over a wide range of temperatures, unlike  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  nanoparticles, which were synthesized by other methods.

**Key words:** nanomagnets, ferromagnetic resonance, Electron Spin Resonance, magnetic properties, low temperatures, microwave band.

Наукове видання

Вакула Артур Сергійович

**ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ВЛАСТИВОСТІ НАНОМАГНЕТИКІВ  
У САНТИМЕТРОВОМУ І МІЛІМЕТРОВОМУ ДІАПАЗОНАХ ДОВЖИН ХВИЛЬ**

Формат 60x84/16. Ум. друк. арк. 0.9. Тир. 100 прим. Зам. 379-17.  
Підписано до друку 05.09.17. Папір офсетний.

Надруковано з макету замовника у ФОП Бровін О.В.  
61022, м. Харків, вул. Трінклера, 2, корп.1, к19. Т. (057) 758-01-08, (066) 822-71-30  
Свідоцтво про внесення суб'єкта до Державного реєстру  
Видавців та виготовників видавничої продукції серія ДК 3587 від 23.09.09 р.

---

---

**СТИЛЬ·**  
**·ИЗДАТ**  
ТИПОГРАФИЯ  
[www.stil-izdat.com](http://www.stil-izdat.com)