Київський національний університет імені Тараса Шевченка

Факультет радіофізики, електроніки та комп’ютерних систем

Кафедра квантової радіофізики

**Магнітопружне керування частотою ФМР у феритових наноциліндрах за допомогою Object Oriented MicroMagnetic Framework (OOMMF) project at ITL/NIST**

Практична робота

студента 2 курсу магістратури

Факультету радіофізики, електроніки та комп’ютерних систем Європіна Богдана Богдановича

Науковий керівник

Попов Максим Олександрович

До захисту допускаю: \_\_\_\_\_\_\_\_ Науковий керівник

*Доктор фіз.-мат.наук Попов Максим Олександрович*

Київ 2022-2023

Зміст

Реферат....…………………………………………………………………………...3

1. Вступ…………………………………………………………………………...4
2. Феромагнітний резонанс…………………………………………..……….…5

2.1 Типи циркуляції за умови феромагнітного резонансу ……………..….…...5

2.2 Магнітопружній вплив на частоту феромагнітного резонансу …...……….х

1. Симуляція в OOMMF ……………………………………..…………...…....хх

3.1

Висновки………………………………………………………………………......хх

Список літератури та джерел……………………………………………...……..хх

Реферат

Звіт з науково-виробничої практики ХХ с, Х рис. Х джерел.

Наведено результати теоретичних досліджень та запропонована перевірка й дослідження за допомогою проведення комп’ютерної симуляції в об’єктно орієнтованому середовищі OOMMF магнітопружнього методу керування частотою феромагнітного резонансу (вигляд та тип циркуляцій) у зразку із залізо-натрієвого ітриту виготовленого у вигляді наноциліндру.

Ключові слова (key words): ферити, феромагніти, феромагнітний, залізо натрієвий ітрит, циліндричні магнітні наноциліндри, частота феромагнітного резонансу, метостатичні циркуляції, феромагнітний резонанс, магнітопружнє керування частотою, OOMMF, Object Oriented MicroMagnetic Framework, , nanoscale cylinder, ferromagnetic resonance and metastable circular vortex states in submicron ferromagnetic particles in Epitaxial Iron Garnet Thin Films

1. Вступ

Феромагнітний резонанс проявляється у вибірковому поглинанні феромагнетиком енергії електромагнітного поля при частотах, що збігаються з власними частотами прецесії магнітних моментів електронної системи феромагнітного зразка у внутрішньому ефективному магнітному полі. Або іншими словами, це нестабільні збудження по всьому об'ємі зразка коливань однорідної прецесії вектора намагніченості, що викликаються магнітним НВЧ-полем, перпендикулярним постійному намагніченому полі

Феромагнітний резонанс виявляється методами магнітної радіоспектроскопії. Його основні характеристики — резонансні частоти, релаксація, тип метостатичної циркуляції, форма і ширина ліній поглинання та нелінійні ефекти визначаються колективною багатоелектронною природою феромагнетизму. При цьому, наявність доменної структури в феромагнетику ускладнює процес, приводячи до можливості появи декількох резонансних піків, а резонансне поглинання НВЧ енергії викликає його локальний нагрів.

Частота феромагнітного резонансу плоского зразка в паралельному зовнішньому полі *B* обчислюється за формулою Ч. Киттеля (англ. С. Kittel) де *M*- намагніченість феромагнетика, — магнітна стала (магнітна проникність вакууму), а *γ*  — гіромагнітне співвідношення:

Дослідження явища для різних типів зразку є корисним з практичної точки зору, оскільки використання явища феромагнітного резонансу лежить в основі роботи багатьох надвисокочастотних пристроїв: резонансних вентилів і фільтрів, параметричних підсилювачів і перетворювачів частоти, обмежувачів потужності.

1. Феромагнітний резонанс.
   1. Типи циркуляції за умови феромагнітного резонансу

Одна з важливих властивостей феромагнетиків, завдяки якій є можливість їх широкого прикладного використання – здатність перебувати у різних метастабільних станах. На щастя, кількість різних метастабільних станів для наномагнетиків значно менше, ніж у звичайних, завдяки чому їх усіх можливо перерахувати та відобразити. Така карта для кругових циліндрів будується у координатах *R/* та *L/* , де *L* – товщина, *R* – радіус, а – довжина обмінної взаємодії, *C* та – константи обмінної взаємодії та магнітна насиченість матеріалу, – магнітна проникність вакууму, -.

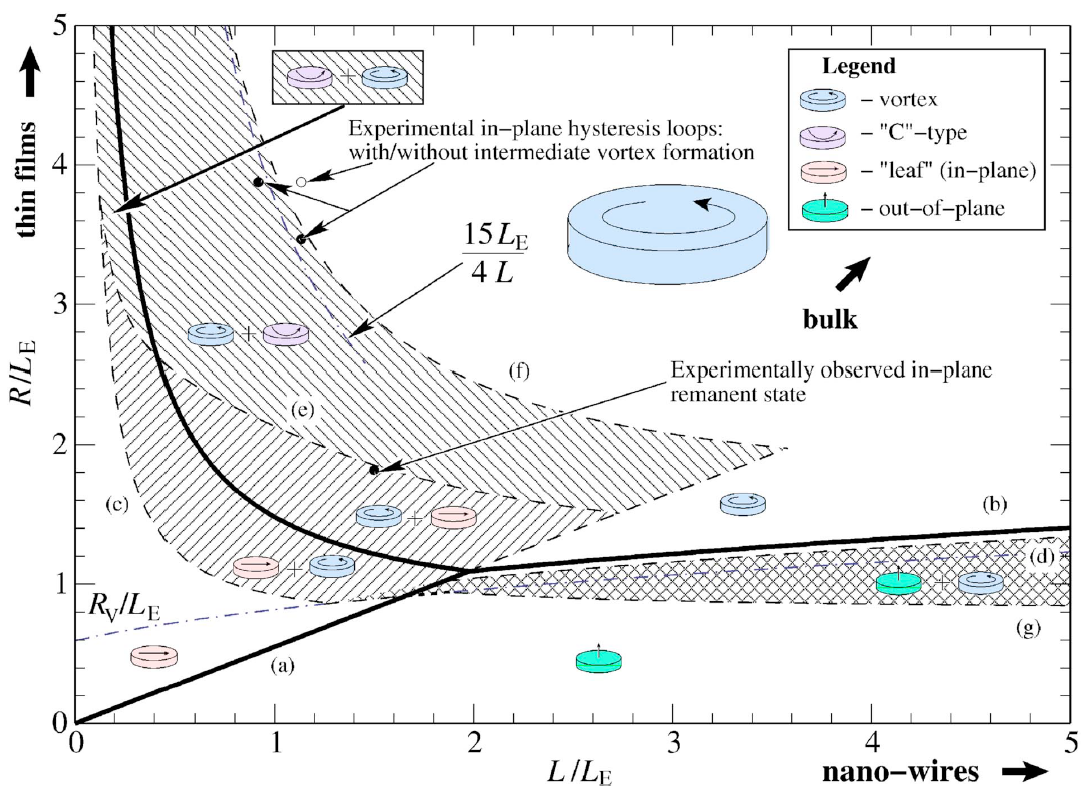
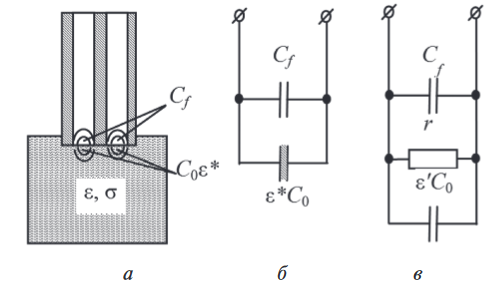


Рис. 1. Графічна репрезентація метастабільних циркуляцій у нано циліндрі. Суцільні лінії показують еквіпотенціальні лінії енергій нижніх станів. Штрихові лінії відповідають втраті стійкості. Кілька станів, представлених символами зі стрілками, можуть бути стабільними в затінених областях. Крайній лівий в кожній групі вказує на основний стан. Формула показують асимптотику лінії переходу C-вихору, а інша штрих-пунктирна лінія є рівноважний щодо зміну типу циркуляції.

2.1 Використання коаксіального зразка

Властивості матеріалу досліджуються шляхом занурення зразка в рідину (рис. 2.1) . Структура полів на кінці пробника спотворяться й зміниться коефіцієнт відбиття (коефіцієнт відбиття).

Рис. 2.1



а) Коксіальний зонд занурений у середовище (речовину) б) в) еквівалентні схеми відкритого кінця хвилевода.

Особливості методу:

1. Широкосмуговий
2. Простий і зручний (не руйнуючий)
3. Обмежена точність вимірювання діелектричної проникності та можливість змінення роздільної здатності тангенсу кута втрат за низьких втрат.
4. Найкращий метод для рідин та пластичних матеріалів

Вимоги до зразка:

1.Товщина більша за половину довжини хвилі

2. Немагнітний

3. Ізотропний та однорідний

4. Плоска поверхня

5.Відсутність повітряних щілин

Основні джерела похибок:

1. Неточність виміру
2. Нестабільність кабелю
3. Повітряні щілини
4. Неточність виміру зразка
   1. Використання лінії передач (хвилеводу)

Методи з використанням лінії передач (хвилеводу) містять розміщення зразка всередині частини закритої лінії передач. Матеріальні параметри знаходять за допомогою вимірів коефіцієнтів відбиття , або проходження (коефіцієнт проходження зразка).

Особливості методу:

1. Широкосмуговий
2. Обмежена роздільна здатність за низьких втрат (залежать від довжини зразка)
3. Можливість вимірювання параметрів мігнітних матеріалів
4. Можливість вимірювання параметрів анізотропних матеріалів

Вимоги до зразка:

* Зразок заповнює січення приладу підключення
* Відсутність щілин на стінках підключення ( відстані до стінок можуть бути вибрані спеціальні, наприклад (довжина хвилі у хвилеводі).
* Гладкі і плоскі поверхні, що розташовані перпендикулярно осі зразка
* Однорідність зразка

Основні джерела похибок:

* Неточність вимірювання сигналу ,
* Недостатньо щільне прилягання матеріалу зразку до стінок хвилеводу
* Порушення паралельності площин, що перпендикулярні осі хвилеводу
* Низька якість обробки поверхонь зразка
* Неточність виміру товщини зразка
  1. Використання об’ємного резонатора

Метод умовно можна поділити на дві групи. У першій збуджують резонанс всередині зразка, а у другій вносять зразок у поле опорного резонатору. В обох методах вимірюють , за якими вже визначають матеріальні параметри.

Особливості методу:

1. Висока точність вимірювань, особливо для першої групи
2. Методи з першої групи підходять для вимірювання характеристик матеріалів з високим значенням діелектричної проникності, а для другої – з низьким.
3. Методи з першої групи підходять для вимірювання характеристик матеріалів з низькими втратами, а для другої – з великими.

Вимоги до зразка: спеціальна форма зразка для полегшення розрахунків.

Основні джерела похибок:

1. Неточність вимірювання ,
2. На методи з першої групи впливають неточності вимірювання розмірів зразка

2.4 Вимірювання у вільному просторі

В даній групі методів зразок опромінюють за допомогою антен. За допомогою тих самих антени вимірюють , .

Особливості методу:

1. Безконтактний , не руйнуючий
2. Високочастотний – нижнє значення обмежено товщиною зразка
3. Може бути виміряний за високої температури
4. Можливе змінення поляризації антен для вимірювання анізотропних матеріалів
5. Можливість вимірювання параметрів магнітних матеріалів

Вимоги до зразка:

1. Великі пласкі зразки з паралельними сторонами
2. Однорідність

Основні джерела похибок:

1. Неточність вимірювання ,
2. Порушення паралельності площин паралельних площині, що перпендикулярна осі розповсюдження хвиль
3. Низька якість обробки поверхонь площин, о перпендикулярні напряму розповсюдження хвиль
4. Неточність виміру товщини зразка

3. Виведення формул для визначення діелектричної та магнітної проникності методом хвилеводу

*-*діелектрична проникність, - магнітна проникність,

, - діелектричний та магнітний кут втрат

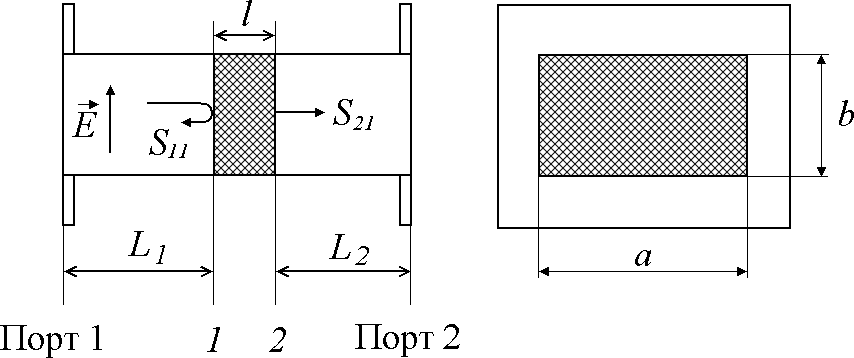


Рис. 3.1 Хвилеводна секція з досліджуваним зразком. a x b – поперечні розміри хвилевода . , - коефіціенти відбиття та проходження на границях 1 та 2 відповідно.

Г – коефіцієнт відбивання в хвилеводі на границі повітря – зразок

Р – коефіцієнт розповсюдження через матеріал зразка в хвилеводі

l – довжина зразка у хвилеводі

- стала розповсюдження

Використовуючи дисперсійне рівняння для хвилевода:

*-* довжина хвилі у вакуумі , , - критична довжина хвилі у хвилеводі (залежить від його розмірів) , - хвильові числа

, - хвильові опори хвилевода з повітряним заповненням та з заповненням матеріалу зразка. Для хвиль типу ТЕ в хвилеводі ці опори рівні: , ,

Висновок

Під час виконаної роботи автор запропонував використовувати додаткове поле для створення магнітопружнього керування частотою феромагнітного резонансу в наноциліндричному зразку та дослідження утворених метастабільних циркуляцій.

Використана література та джерела

1. NUMERICAL INVESTIGATION OF DIPOLE-EXCHANGE SPIN EXCITATIONS IN NICKEL NANOWIRES Zavislyak I. V., Popov M. A. National Taras Shevchenko University of Kyiv 64 Volodymyrska Str., Kyiv, 01033, Ukraine Ph.: +38(044) 521-32-37; e-mail: maxim\_popov@univ.kiev.ua

<https://www.researchgate.net/publication/236949712_Numerical_investigation_of_dipole-exchange_spin_excitations_in_nickel_nanowires>

1. The Object Oriented MicroMagnetic Framework (OOMMF) project at ITL/NIST [https://math.nist.gov/oommf/](https://www.youtube.com/watch?v=dQw4w9WgXcQ&ab_channel=RickAstley)
2. MAP OF METASTABLE STATES FOR THIN CIRCULAR MAGNETIC NANOCYLINDERS Konstantin L. Metlov and YoungPak Lee, Citation: Appl. Phys. Lett. 92, 112506 (2008); doi: 10.1063/1.2898888, <https://arxiv.org/abs/0707.2938>
3. STRESS-INDUCED PERPENDICULAR MAGNETIZATION IN EPITAXIAL IRON GARNET THIN FILMS

Masashi Kubot Atsushi Tsukazaki Fumitaka Kagawa Keisuke Shibuya1y

Yusuke Tokunaga1, Masashi Kawasaki and Yoshinori Tokura Applied Physics Express 5 (2012) 103002 103002-1 # 2012 The Japan Society of Applied Physics

<https://www.researchgate.net/publication/259127659_Stress-Induced_Perpendicular_Magnetization_in_Epitaxial_Iron_Garnet_Thin_Films>

1. MAGNETOSTRICTION CONSTANTS OF EPITAXIAL LA, GA ( YIG FILMS MEASURED MICROWAVE RESONANCE) B. Hoekstra, F. van Doveren, and J. M. Robertson Philips Research Laboratories, Eindhoven, The Netherlands Received 15 November 1977

<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1977ApPhy..12..261H/abstract>

1. INTEGRATED NON-RECIPROCAL DUAL H- AND E-FIELD TUNABLE BANDPASS FILTER WITH ULTRA-WIDEBAND ISOLATION Hwaider Linl, Jing Wul\*, Xi Yanfl, Zhongqiang Hul, Tianxiang Nan], Saloru Emoril, Yuan Gaol, Rongdi Guo], Xinjun Wang], and Nian X Sunl IDepartment of Electrical and Computer Engineering, Northeastern University, Boston, MA 02115 USA

Beijing Institute of Technology, Beijing 100083, China

<https://ieeexplore.ieee.org/document/7167041>

1. RECONFIGURABLE NANOSCALE SPIN-WAVE DIRECTIONAL COUPLER Qi Wang, Philipp Pirro, Roman Verba, Andrei Slavin, Burkard Hillebrands, and Andrii v. Chumak Science Advances 19 Jan 2018 <https://arxiv.org/abs/1704.02255>
2. MICROMAGNETIC SIMULATIONS OF SMALL ARRAYS OF SUBMICRON FERROMAGNETIC PARTICLES Christine C. Dantas\* and Luiz A. de Andrade†

Divisão de Materiais (AMR), Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE), Comando-Geral de Tecnologia Aeroespacial (CTA),

Praça Mareçhal Eduardo Gomes, 50 Vila das Acácias-CEP 12228-904, São José dos Campos-SP-Brazil Received 29 April 2008; published 31 July 2008

<https://arxiv.org/abs/0807.1978>

1. MICROMAGNETIC CALCULATIONS OF FERROMAGNETIC RESONANCE IN SUBMICRON FERROMAGNETIC PARTICLES S. Jung, J. B. Ketterson, and V. Chandrasekhar Department of Physics and Astronomy, Northwestern University, Evanston, Illinois 60208 ~Received 30 May 2002; published 8 October 2002!

<https://arxiv.org/pdf/cond-mat/0109307.pdf>

1. ВЛИЯНИЕ КОСВЕННОГО ОБМЕННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НА ФЕРРОМАГНИТНЫЙ РЕЗОНАНС В МАГНИТНЫХ НАНОГРАНУЛИРОВАННЫХ ПЛЕНКАХ Ю.И. Джежеря, А.Ф Кравец, И.М. Козак\* Е.В. Шипиль, А.Н. Погорелый Институт магнетизма, НАН и МОН Украины, пр. Вернадского, 36-б, 03142 Киев, Украина (Получено 22.11.2013; опубликовано online 31.01.2014)

<https://jnep.sumdu.edu.ua/download/numbers/2013/4/articles/jnep_2013_V5_04075.pdf>