

Нелінійні процеси в магнітних наноточках при перпендикулярній накачці: мікромагнітне моделювання

Д.В. Слободянюк*, Г.А. Мелков

*Київський національний університет ім. Тараса Шевченка, радіофізичний факультет,
вул. Володимирська, 64, 01601 Київ, Україна*

(Одержано 10.12.2012; опубліковано online 28.03.2013)

Розглянуто процеси, що відбуваються в магнітних наноточках на основі пермалоя під впливом зовнішньої електромагнітної накачки. Показано, що в таких системах мають місце процеси, аналогічні процесам, що відбуваються в масивних зразках: аналоги процесів Сулівської та кінетичної нестійкості. За допомогою мікромагнітного моделювання встановлено ключові особливості збудження мод системи при зростанні потужності зовнішньої електромагнітної накачки. Результати моделювання було співставлено з наявними в літературі експериментальними даними по дослідженню магнітних наноточок в нелінійному режимі.

Ключові слова: Наноточка, Пермалой, Перпендикулярна накачка, Сулівська нестійкість, Кінетична нестійкість.

PACS numbers: 75.40.Gb, 73.30.Ds, 75.75. – c

1. ВСТУП

Магнітні наноструктури та штучні кристали на їх основі останнім часом викликають широкий інтерес. Такі структури є перспективними з точки зору створення різноманітних приладів обробки та збереження інформації, зокрема магнітної пам'яті [1]. Окремим цікавим питанням є поведінка таких структур при великих кутах магнітної прецесії. В такому випадку у вказаних системах починають проявлятися різноманітні нелінійні ефекти, природа яких ще не до кінця зрозуміла.

Ключовою особливістю наноелементів є перебування їх спин-хвильового спектру зі зменшенням розмірів [2]. Так, для круглих наноточок радіуса R зникають усі спин-хвильові збудження з $k < R^{-1}$. Замість неперервного набору частот і відповідних їм хвильових чисел, в системі з'являються окремі дискретні моди. Всі ці особливості суттєвим чином впливають на поведінку таких систем в нелінійному режимі.

У даній роботі досліджено поведінку пермалоевіого наноеlementу при дії на нього т.з. перпендикулярної накачки [3]. Результати мікромагнітного моделювання порівнюються з експериментальними результатами роботи [4], присвяченій дослідженню пермалоевих наноточок в сильно нелінійному режимі.

2. ДИНАМІЧНІ ПРОЦЕСИ В НАНОТОЧЦІ

При дії перпендикулярної накачки на наноточку в ній відбувається цілий ряд процесів. Насамперед у випадку перпендикулярної накачки відбувається збудження однорідної (або точніше квазіоднорідної, оскільки мова йде про наноеlement) моди з частотою, що дорівнює частоті зовнішньої накачки. Такі процеси є повним аналогом вимушених коливань у теорії коливачів. При зростанні амплітуди однорідної моди в системі, внаслідок процесів аналогічних Сулівській нестійкості в масивних зразках [5], відбувається збудження неоднорідної моди. Характерною

особливістю наноточок, як зазначалося раніше, є дискретність спин-хвильового спектру, тому збуджується неоднорідна мода найближча по частоті до однорідної. В масивних же зразках завжди існує мода, вироджена по частоті з однорідною. Закон збереження енергії в цьому випадку має наступний вигляд:

$$2\omega_0 = \omega_n + \omega_n + 2\Omega \quad (1.1)$$

тут ω_0 – частота однорідної моди, ω_n – частота неоднорідної моди, Ω – розстрочка по частоті між однорідною та неоднорідною модами внаслідок дискретності спектру. Процеси типу (1.1) природно називати процесами нерезонансної Сулівської нестійкості.

Нарешті, при подальшому зростанні амплітуди зовнішньої накачки і амплітуд однорідної та неоднорідної мод, остання сама починає слугувати накачкою іншим модам в системі. Процеси типу:

$$\omega_0 + \omega_0 = \omega_1 + \omega_2 \quad (1.2)$$

призводять до перерозподілу енергії в системі і збудження мод ω_1 та ω_2 . В суцільних зразках такі процеси дістали назву кінетичної нестійкості і спостерігались при перпендикулярній [6] та паралельній накачці [7] в півках залізо-ітрієвого гранату. Характерною особливістю процесів (1.2) є те, що однією зі збуджених мод виявляється найнижча мода спектру, оскільки вона має мінімальний параметр затухання. Таким чином динамічні процеси в наноточках є де-що схожими на відповідні їм процеси в суцільних зразках, однак наявність дискретного спектру зумовлює їх важливі особливості.

3. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

Для дослідження динаміки магнітної наноточки під дією перпендикулярної накачки, нами було використано пакет для мікромагнітного симуляції ООММФ [8]. Він базується на розв'язанні дискретного рівняння Ландау-Ліфшиця-Гільберта у формі [3]:

* denslobod@ukr.net

$$\frac{d\vec{m}}{dt} = \gamma(\vec{h}_{eff} \times \vec{m}) + \alpha\vec{m} \times \frac{d\vec{m}}{dt} \quad (3.1)$$

тут γ – гіромагнітне відношення, α – стала Гільберта, яка дорівнює 0.01. Величини, \vec{m} , \vec{h}_{eff} – намагніченість та ефективне поле відповідно, нормовані на намагніченість насичення M_0 . Намагніченість насичення обиралась як $M_0 = 7.6 \times 10^5$ А/м, обмінна константа $A = 1.3 \times 10^{-12}$ Дж/м, зовнішнє постійне магнітне поле $H_0 = 71.6 \times 10^3$ А/м. Для дослідження було обрано наноточку еліптичного перерізу з латеральними розмірами 500×250 нм товщиною 10 нм як у роботі [4]. Розміри комірки для моделювання обирались як $3.5 \times 3.5 \times 10$ нм. Варто зазначити, що вибір розміру комірки по осі z рівною товщині наноточки означає, що ми будемо досліджувати лише однорідні по товщині наноточки моди, нехтуючи можливими неоднорідностями розподілу намагніченості по товщині. Таке припущення справедливе для не дуже великих амплітуд змінного магнітного поля, яке збуджує намагніченість зразка.

Зовнішнє змінне магнітне поле частоти $f = 9.73$ ГГц прикладалося перпендикулярно до напрямку постійного магнітного поля підмагнічування. Моделювання проводилося в два етапи. На першому етапі динаміка системи симулювалася протягом $\tau = 10$ нс. На другому етапі результат моделювання - часова залежність намагніченості кожної комірки системи – оброблялась методом швидкого Фур'є-перетворення з метою визначення частот коливань системи.

4. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

В результаті проведеного моделювання було визначено частоти системи, що збуджуються під дією перпендикулярної накачки. Результати моделювання наведено на рис. 1. Бачимо, що при малій амплітуді збуджуючого поля (рис. 1а), збуджено лише коливання на частоті зовнішньої накачки $f = 9.73$ ГГц. Однак, при зростанні амплітуди збуджуючого поля в системі починають проявлятися нелінійності і відбувається збудження мод з частотою не рівною частоті збуджуючого поля (див. рис. 1б, в). Поява цих частот є свідченням протікання у системі процесів кінетичної нестійкості (1.2). Частоти збуджених мод виявляються пов'язаними співвідношенням (1.2): частота нижньої збудженої моди на рис. 1б складає $f_1 = 8.63$ ГГц, відповідно частота верхньої збудженої моди має дорівнювати $2f - f_1 = 10.83$ ГГц, що гарно підтверджується результатами моделювання. Характерною особливістю системи є те, що частоти збуджених мод не є сталими, а змінюються з ростом амплітуди накачки. Така поведінка пов'язана з тим, що по мірі росту амплітуд однорідної та неоднорідної мод, намагніченість системи зменшується. Відповідно зменшується і частота моди, що відповідає дну спектра (див. рис. 1б-в.). Окремо необхідно обговорити питання про амплітуди мод, що збуджуються. Як зазначалося вище, однією зі збуджених мод виявляється мода, частота якої відповідає дну спін-хвильового спектру наноточки.

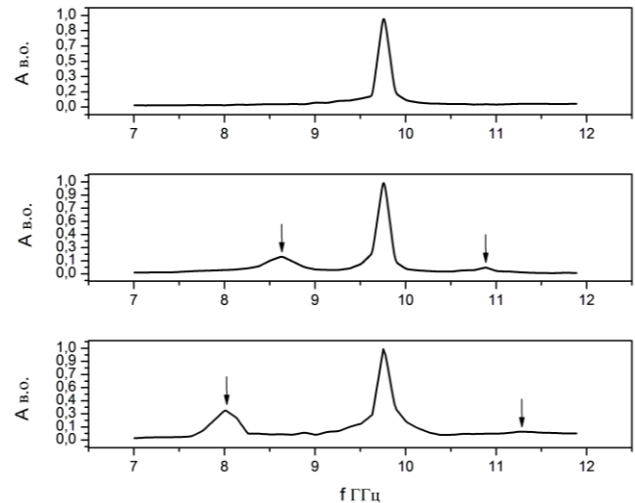


Рис. 1 – Спектр коливань збудженої наноточки при різних амплітудах збуджуючого поля. Стрілками відмічено амплітуди збуджених мод що задовольняють умові (1.2)

Відповідно до співвідношення (1.2) частота верхньої моди f_2 виявляється жорстко фіксованою. Як зазначалося вище, у наноелементах спін-хвильовий спектр є дискретним, а значить моди, що чітко відповідає умові $f_2 = 2f - f_1$, в системі може не бути. В такому випадку збуджується найближча по частоті мода, що задовольняє вказаній умові. Легко зрозуміти, що ефективність такого нерезонансного процесу буде меншою, а отже і амплітуда збудженої моди буде малою в порівнянні з найнижчою модою. Іншим важливим фактором є те, що дисипація моди, яка має вищу частоту є більшою.

Для підтвердження зроблених висновків в результаті моделювання було проведено порівняння одержаних результатів з експериментальними результатами роботи [4], присвяченій дослідженню пермалоевих наноелементів методами брілюєнівського розсіяння світла при перпендикулярній накачці. Всі параметри моделюваної системи відповідають зразкам, що досліджувалися у вказаній роботі. Авторами роботи [4] було зафіксовано збудження в системі мод на частоті, відмінній від частоти збуджуючого поля перпендикулярної накачки при перевищенні потужності накачки $P_{ник}$ певного рівня. В цитованій роботі вказаний ефект трактувався як певний аналог Бозе-Енштейнівської конденсації магнітонів [9], однак авторами було проігноровано факт збудження окрім найнижчої моди системи і моди з частотою близькою до $f_2 = 2f - f_1$ (див. рис. 3б в роботі [4]). Результати моделювання разом з даними роботи [4] наведено на рис. 2. Штриховані області на рис. 2 відповідають областям, в яких в експерименті було зафіксовано наявність додаткових збуджених мод в системі. В першу чергу необхідно зазначити, що області існування найнижчої моди на частоті високочастотної моди не є однаковими. Це пов'язано з різною амплітудою відповідних мод в системі. Як зазначалося раніше, амплітуда високочастотної моди є меншою, ніж амплітуда найнижчої моди системи. Несиметричність в області існування мод також підтверджується результатами моделювання (див. суцільні лінії на рис. 2).

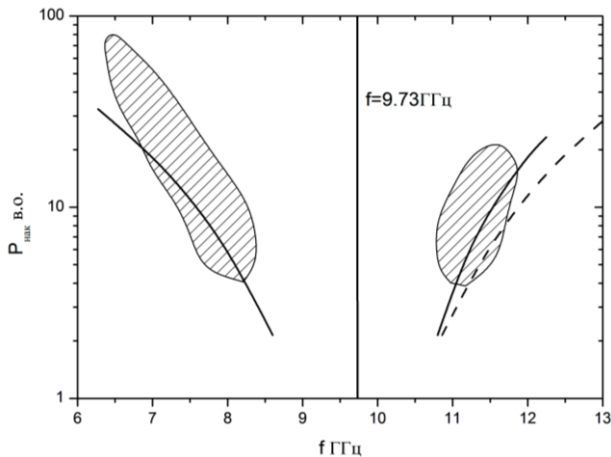


Рис. 2 – Порівняння експериментальних результатів роботи [4] (штриховані області) та моделювання (суцільна лінія). Штрихова лінія відповідає розрахованій за формулою (1.2) частоті високочастотної моди при заданій частоті найнижчої моди. Вертикальна лінія відповідає частоті зовнішньої перпендикулярної накачки 9.73 ГГц

Тепер обговоримо питання про причини обмеженості областей існування мод по амплітуді збуджуючого поля. Як зазначалося, при збільшенні амплітуди накачки, що діє на систему, в ній проявляються все нові й нові нелінійності. Відповідно відбувається збудження все більшого числа мод з різними частотами. Таким чином, спектр коливань системи стає все більш складним, амплітуди обраних гармонік зменшуються і енергія розподіляється по великій кількості збуджених мод. Крім того, наростають і теплові шуми, очевидно, що існує потужність накачки, при якій амплітуда обраних мод зрівняється з амплітудою фонових шумів та інших збуджених мод і вони стануть недекоративними в експерименті. Варто зазначити, що з іншого боку наш погляд для таких великих потужностей накачки не є придатним оскільки під час моделювання ми нехтуємо товщинними неоднорідностями намагніченості системи що розглядається.

Нарешті, розглянемо питання про зсув частот збуджених мод з ростом потужності накачки. На рис. 2 бачимо, що і в моделюванні, і в експерименті зсув частот з ростом потужності накачки виявився приблизно однаковим, однак зсув частоти високочастотної моди відрізняється від передбаченого умовою (1.2). Це свідчить про нерезонансне збудження вказаної моди, тобто про відсутність в системі моди, яка б задовольняла умову (1.2). Цікавим є і той факт, що в моделюванні моди в системі з'являються за менших потужностей накачки ніж в експерименті. Ймовірно це пов'язано з неврахованими в моделюванні чинниками, які можуть збільшити поріг процесу (1.2), наприклад, сильна залежність затухання від профілю збудженої моди.

5. ВИСНОВКИ

Таким чином, в роботі розглянуто питання про нелінійні процеси в магнітних наноточках при дії перпендикулярної накачки шляхом використання апарату мікромагнітного моделювання. Було показано, що в таких системах, при певних потужностях зовнішньої електромагнітної накачки, можуть розвиватися процеси, аналогічні процесам кінетичної нестійкості в суцільних зразках, в результаті яких в спектрі системи окрім коливань на частоті зовнішньої накачки з'являються коливання, що відповідають найнижчій моді спектру наноточки та високочастотне коливання. Їх частоти виявляються пов'язаними між собою і частотою збуджуючої сили. Результати мікромагнітного моделювання було співставлено з відомими експериментальними даними по дослідженню нелінійної динаміки пермалоевих наноточок. Одержано гарну відповідність між теорією та експериментом.

ПОДЯКИ

Автори висловлюють подяку Ф. Ciubotaru та О. Пилиповському за плідну дискусію і цінні зауваження.

Нелинейные процессы в магнитных наноточках при перпендикулярной накачке: микромагнитное моделирование

Д.В. Слободянюк, Г.А. Мелков

Киевский национальный университет им. Тараса Шевченко, радиофизический факультет, ул. Владимирская, 64, 01601 Киев, Украина

Рассмотрены процессы, которые имеют место в магнитных наноточках на основе пермаллоя под действием внешней электромагнитной накачки. Показано, что в таких системах происходят процессы, аналогичные процессам в массивных образцах: аналоги процессов Суловской и кинетической неустойчивости. С помощью микромагнитного моделирования были установлены ключевые особенности возбуждения мод системы при возрастании мощности внешней электромагнитной накачки. Результаты моделирования сравнены с экспериментальными данными по исследованию магнитных наноточек в нелинейном режиме.

Ключевые слова: Наноточка, Пермаллой, Перпендикулярная накачка, Суловская неустойчивость, Кинетическая неустойчивость.

Nonlinear Processes in Magnetic Nanodots under Perpendicular Pumping: Micromagnetic Simulations

D.V. Slobodiainuk, G.A. Melkov

*National T. Shevchenko university of Kyiv, faculty of radiophysics,
64, Volodymyrs'ka Str., 01601 Kyiv, Ukraine*

Processes that take place in permalloy nanodots under external electromagnetic pumping are considered. It is shown that in such system similar to bulk samples Suhl and kinetic instability processes are possible. Using micromagnetic simulations approach key features of mode excitation with an external pumping power increase were revealed. Results of the simulations were compared with published experimental data dedicated to investigation of magnetic nanodots in nonlinear regime.

Keywords: Nanodot, Permalloy, Perpendicular pumping, Suhl instability, Kinetic instability.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРИ

1. D.J. Sellmyer, R. Skomski, *Advanced magnetic nanostructures* (New York: Springer: 2006).
2. Y. Kobljanskyj, G. Melkov, K. Gusliencko, V. Novosad, S.D. Bader, M. Kostylev, A. Slavin, *Sci. Rep.* **2**, 478 (2012).
3. А.Г. Гуревич, Г.А. Мелков, *Магнитные колебания и волны* (Москва: Наука: 1987).
4. V.E. Demidov, H. Ulrichs, S.O. Demokritov, S. Urazhdin, *Phys. Rev. B* **83**, 020404(R) (2011).
5. H. Suhl, *J. Phys. Chem. Solids* **1**, 209 (1957).
6. Г.А. Мелков, А.Ю. Тараненко *ЖЭТФ* **91**, 1007 (1986).
7. А.В. Лаврененко, В.С. Львов, Г.А. Мелков, В.Б. Черепанов, *ЖЭТФ* **81**, 1022 (1981).
8. <http://math.nist.gov/oommf/>
9. S.O. Demokritov, V.E. Demidov, O. Dzyapko, G. A. Melkov, A.A. Serga, B. Hillebrands, A.N. Slavin, *Nature* **443**, 430 (2006).