08

Нелинейная динамика магнитных колебаний и ориентационные переходы в трехслойных анизотропных пленках

© И.Е. Абрамовский, Л.Н. Котов, А.В. Голов

Сыктывкарский государственный университет,
Сыктывкар, Россия

E-mail: abramowsk-ivan@mail.ru

Поступила в Редакцию 30 апреля 2024 г.
В окончательной редакции 28 октября 2024 г.
Принята к публикации 30 октября 2024 г.

Исследованы ориентационные переходы вектора намагниченности из одной кристаллографической оси к другой в трехслойной структуре при изменении величины обменного взаимодействия магнитных слоев за счет варьирования толщины немагнитного тонкого слоя между ними. Исследовано влияние константы обменной связи на нелинейную магнитную динамику и поведение ориентационных переходов векторов намагниченности магнитных слоев. Анализ результатов показывает, что изменение материальных параметров, таких как константы обменной связи и магнитной анизотропии слоев структуры влечет за собой изменение режимов магнитных колебаний.

Ключевые слова: трехслойная структура, ориентационные переходы, обменная связь, кубическая магнитная анизотропия.

DOI: 10.61011/FTT.2024.12.59581.6561PA

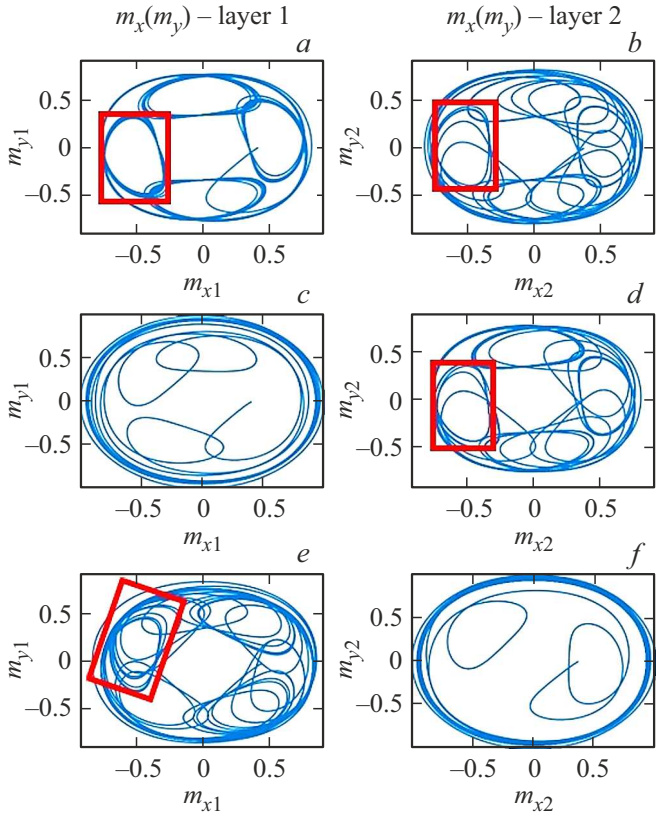
В последнее десятилетие нелинейная магнитная динамика в многослойных структурах активно изучалась в связи с приложениями в спинтронике при разработке спиновых транзисторов и ячеек памяти MRAM [1]. Применение многослойных магнитных пленок основано на выявлении определенных закономерностей и эффектов, таких как кратное изменение частоты колебаний, генерация новых колебательных мод, передача вращательного момента спина, которые основаны на квантовомеханической природе и ориентационных переходах в многослойных структурах [2–5]. Эти эффекты способствуют использованию этих структур в современной электронике [1,2]. В данной работе изучены магнитные ориентационные переходы, возникающие при наличии нелинейных магнитных колебаний в магнитных слоях структуры. Ранее в работах [5,6] были выявлены режимы прецессии положения равновесия вектора намагниченности, развернутой круговой прецессии, режим деления частоты прецессии на три интервала. Также было обнаружено неоднозначное влияние поля обменного взаимодействия, задаваемого коэффициентом обменной связи J между соседними магнитными слоями. Данная неоднозначность проявлялась в наличии интервала амплитуд переменного магнитного поля, в котором возникали хаотические колебания вектора намагниченности [7]. В данной работе проведено численное моделирование колебаний вектора намагниченности в условиях ориентационного перехода в трехслойной структуре, намагниченной по нормали, с ориентацией полей магнитной анизотропии вдоль оси [001]. Для моделирования магнитной динамики для двух магнитных слоев записывалась система из трех нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений на основе векторного уравнения Ландау-Лифшица [5]. Учет взаимодействия двух соседних магнитных слоев структуры через немагнитную тонкую прослойку сводит задачу магнитной динамики к системе из шести дифференциальных уравнений, которые в данной работе решались численно методом Рунге-Кутта 4–5 порядка:

$$\frac{\partial m_{x1}}{\partial t} = -\frac{\gamma}{1+\alpha_1^2}\cdot\Big[(m_{y1}+\alpha_1 m_{x1}m_{z1})\cdot H_{ez1} - (m_{z1}-\alpha_1 m_{y1}m_{x1})\cdot H_{ey1} - \alpha_1\cdot(m_{y1}^2+m_{z1}^2)\cdot H_{ex1}\Big], \quad (1)$$

$$\mathbf{H}_e = -\frac{1}{M_0}\frac{\partial U}{\partial \mathbf{m}},\ U = -M_0 h_x m_x - M_0 h_y m_y - M_0 H_{0z} m_z + 2\pi M_0^2 m_z^2 + 2J\mathbf{M}^2 + K(m_x^2+m_y^2+m_z^2), \quad (2)$$

где m_{i1} — единичная i-компонента $(i = x, y, z)$ 1-слоя, γ — гиромагнитное отношение для спина электрона, $\alpha_1 = 0.15$ — коэффициент магнитной диссипации слоя, M_0 — намагниченность насыщения слоя, $h_{x,y}$ — компоненты переменного магнитного поля, H_{0z} — постоянное магнитное поле вдоль Oz, J — коэффициент обменного взаимодействия, K — константа анизотропии.

Циклическая перестановка индексов x, y, z в (1) позволяет получить дифференциальные уравнения для одного из магнитных слоев, а замена индекса 1 на 2 позволяет найти эту систему уравнений для второго магнитного слоя. Выражение для свободной плотности энергии магнитного слоя позволяет найти уравнения для эффективных магнитных полей с помощью дифференцирования энергии по компонентам намагниченности (2).



Портреты колебаний единичных компонент вектора намагниченности для двух магнитных слоев трехслойной структуры с ростом коэффициента обменной связи J, erg/cm^3: 0 (*a, b*), 57 (*c, d*), 155 (*e, f*). Левая колонка рисунков (*a, c, e*) относится к первому слою, а правая колонка рисунков (*b, d, f*) относится ко второму слою. Красным прямоугольником показаны области сгущений колебаний или потенциальных ям, между которыми осуществляются переключения.

Так как вектор намагниченности слоя представляет из себя единичный магнитный домен при условии, что размеры пленки намного больше ее толщины, то при расчетах мы пользовались приближением модели однородной намагниченности в слоях структуры. При расчетах предполагалось, что константы диссипации магнитных слоев одинаковы $\alpha_1 = \alpha_2$, константа анизотропии $K = 1350\,\text{erg/cm}^3$, также одинакова для обоих слоев пленки, а величина намагниченности соседних слоев незначительно отличается: $M_{01} = 23.1\,\text{G}$, $M_{02} = 22.7\,\text{G}$. Значения намагниченности и константы магнитной анизотропии были выбраны близкими к аналогичным константам для кристалла $Y_3Fe_5Al_1O_{12}$ [7]. Обменное поле взаимодействия магнитных слоев бралось пропорциональным намагниченности [5]. В качестве внешних полей были рассмотрены поляризованное по кругу переменное магнитное поле с амплитудой 55 Oe и частотой 500 MHz, ориентированное в плоскости магнитных слоев, и постоянное магнитное поле, величиной в 265 Oe было направлено по нормали к плоскости структуры.

Анализ численных решений системы уравнений показал, что в магнитных слоях структуры возникает переходный режим, в рамках которого в одном из слоев устанавливался режим колебаний большой амплитуды с переходом от одного потенциального барьера к другому, при этом в другом слое создается классическое прецессирование положения равновесия вектора намагниченности (см. рисунок). С ростом константы обменного взаимодействия J или обменного поля возникает критический переход, когда магнитная динамика в слое меняется на противоположную (рисунок *a–d*). При этом в слое с переходами между барьерами устанавливалась классическая прецессия вектора намагниченности, а в соседнем — осуществлялись переходы от барьера к барьеру (рисунок *c, d*). Можно говорить о том, что под действием обменного поля происходят морфологические изменения энергетической поверхности потенциальной энергии магнитных слоев структуры. Данные изменения носят периодический характер, что позволяет говорить о переменном влиянии обменного поля на вид портретов магнитных колебаний. Общая серия портретов колебаний показывает такую динамику: при значениях обменного поля от 0 до 56 erg/cm^3 на изображениях наблюдаются магнитные колебания в области минимумов энергии, обусловленных полем кубической анизотропии (рисунок *a, b*). При дальнейшем увеличении обменной энергии от 57 erg/cm^3 наблюдается резкий переход — локализация сгущений в первом слое исчезает, а для второго слоя — локализация сгущений достаточно высокая, и наблюдается вплоть до величины 150 erg/cm^3 (рис. *c, d*). Далее увеличивая обменную энергию от 150 erg/cm^3 снова наблюдается резкий переход — в первом слое мы видим области магнитных колебаний возле локальных минимумов энергии (рисунок *e*), в то время как во втором слое вектор намагниченности описывает высокоамплитудные колебания вплоть до значений коэффициента обменной связи 170 erg/cm^3.

Таким образом, в данной работе были исследованы нелинейные режимы магнитных колебаний и прецессии векторов намагниченности в соседних магнитных слоях трехслойной структуры с ориентацией оси магнитной анизотропии вдоль кристаллографической оси [001], направленной вдоль нормали слоев структуры. При увеличении обменного взаимодействия между магнитными слоями структуры было выявлено бифуркационное поведение прецессии векторов намагниченности, характеризуемое изменениями характера сгущений и разряжений траекторий движения конца вектора намагниченности на портретах магнитных колебаний. Полученные портреты колебаний показывают, что положения сгущений колебаний или потенциальных ям при изменении констант обменной связи смещаются, а при некоторых значениях констант они отсутствуют. Расчеты показывают, что при бифуркационных переходах между разными режимами прецессии векторов намагниченности слоев происходит сильный частотный сдвиг низкочастотной составляющей частоты прецессии. Данные эффекты могут быть

использованы в различных электронных устройствах, например, в устройствах преобразования частоты.

Финансирование работы

Исследования выполнены за счет гранта Российского научного фонда, проект № 21-72-20048.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] A. Claas. Eur. Phys. J. B **92**, 120 (2019). DOI: 10.1140/epjb/e2019-90599-6
[2] U. Vernik, A.M. Lomonosov, V.S. Vlasov, L.N. Kotov, D.A. Kuzmin, I.V. Bychkov, P. Vavassori, V.V. Temnov. Phys. Rev. B **106**, 144420 (2022). DOI: 10.1103/PhysRevB.106.144420
[3] Л.Н. Котов, М.Ю. Дианов, В.С. Власов, Ф.Ф. Асадуллин. Изв. РАН. Сер. Физ. **86**, *9*, 1363–1368 (2022). DOI: 10.31857/S0367676522090150
[4] Л.Н. Котов, М.Ю. Дианов, В.С. Власов, В.В. Миронов. Изв. РАН. Сер. Физ. **87**, *4*, 473–480 (2023). DOI: 10.31857/S0367676522700843
[5] L. Kotov, V. Vlasov, A. Golov, I. Abramovskiy. 2023 International Conference on Next Generation Electronics (NEleX), Vellore, India, 2023, pp. 1–5. DOI: 10.1109/NEleX59773.2023.10421393
[6] В.Н. Шапоров, Л.Н. Котов, В.С. Власов. Изв. РАН. Сер. Физ. **86**, *5*, 753 (2022). DOI: 10.31857/S0367676522050234
[7] Б.А. Голдин, Л.Н. Котов, Л.К. Зарембо, С.Н. Карпачев. Спин — фононные взаимодействия в кристаллах (ферритах). Л.: Наука, М. (1991). 148 с.

Редактор А.Н. Смирнов