

УДК 537.635

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ РЕЖИМОВ ПРЕЦЕССИИ НАМАГНИЧЕННОСТИ В ДВУХСЛОЙНОЙ ФЕРРОМАГНИТНОЙ СТРУКТУРЕ

© 2022 г. И. Е. Абрамовский^{1, *}, В. С. Власов¹, Д. А. Плешев^{1, 2}, Л. Н. Котов¹, В. И. Щеглов³

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
“Сыктывкарский государственный университет имени Питирима Сорокина”, Сыктывкар, Россия

²Сыктывкарский лесной институт (филиал) федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования

“Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова”, Сыктывкар, Россия

³Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

“Институт радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова Российской академии наук”, Москва, Россия

*E-mail: abramowsk-ivan@mail.ru

Поступила в редакцию 13.12.2021 г.

После доработки 24.12.2021 г.

Принята к публикации 21.01.2022 г.

Рассмотрена прецессия второго порядка вектора намагниченности в двухслойной структуре, обладающей магнитной связью между слоями. Получены численные решения для динамики магнитной подсистемы двухслойной пленки. Построены прецессионные портреты движения векторов намагниченности в случае влияния внешних асимметричных полей и внутренних полей анизотропии на динамику намагниченности. Установлена связь константы межслойного взаимодействия с видом и характером параметрических портретов намагниченности.

DOI: 10.31857/S0367676522050027

ВВЕДЕНИЕ

В области современной физики в условиях ограниченности технического и лабораторного оснащения активно развивается область моделирования физических процессов различного уровня сложности. Одним из направлений данной отрасли является моделирование нелинейных магнитных эффектов, возникающих в тонкопленочных структурах, обладающих разнообразными свойствами. Наличие интереса по данной тематике объясняется тем, что физика данных структур весьма специфична и обладает уникальными свойствами, способными заинтересовать различные отрасли производства, а что особенно интересно — область вычислительной техники. Сугубо электронные устройства уже давно плавно отодвигаются на второй план, уступая место устройствам новых типов, таких как магнитно-резистивная память, спиновые процессоры, спиновые вентили и др. [1]. В основе работы этих устройств лежит нелинейная спиновая динамика в многослойных магнитных структурах. Часто работа таких устройств связана также со спин-ориентационными фазовыми переходами в планарных структурах [2, 3]. Наша работа посвящена анализу нелинейной динамики в двухслойной структуре. Анализ проводится на основе чис-

ленных методов и двухслойная пленка, рассмотренная в работе, может использоваться в качестве элементной базы для построения новых приборов для физических экспериментов таких как: датчики постоянных и переменных полей с высокой разрешающей способностью; высокоточные устройства измерения постоянных и переменных магнитных полей; точные приборы для стабилизации амплитуд полей [4].

Нами было проведено моделирование различных режимов магнитной динамики в условиях ориентационного перехода в намагниченной по нормали слоистой структуре, которые были описаны ранее в работах [5, 6] применительно к случаю одного ферритового слоя.

ГЕОМЕТРИЯ ЗАДАЧИ И ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ

В работе исследуются магнитные колебания в намагниченной по нормали двухслойной структуре, которая помещена в переменное поляризованное по кругу магнитном поле \vec{h}_{xy} , плоскость поляризации которого совпадает с плоскостью пленки. Динамика намагниченности пленки описывается

уравнением Ландау–Лифшица с диссипативным членом в форме Гильберта:

$$\frac{\partial \vec{m}}{\partial t} = -\gamma [\vec{m} \times \vec{H}_e] + \alpha \left[\vec{m} \times \frac{\partial \vec{m}}{\partial t} \right], \quad (1)$$

где \vec{m} – единичный вектор намагниченности, γ – гиромагнитное отношение, \vec{H}_e – эффективное магнитное поле, α – параметр магнитной диссипации.

Внутреннее поле двухслойной ферромагнитной структуры можно представить в виде совокупности полей кубической анизотропии, описанных в работе [5], размагничивающих полей слоев пленки, задаваемых через компоненты тензора размагничивающих коэффициентов [7], а также поля взаимодействия слоев, пропорционального намагниченности соседнего слоя с константой взаимодействия J [8, 9].

Рассматривается пленка, которая может иметь кубическую анизотропию [100] или [110] либо [111] [5]. Ограничим рассмотрение первой константой кубической анизотропии, которую обозначим K . Будем считать вклад других констант в энергию анизотропии много меньшим, чем для первой константы анизотропии. Энергия анизотропии для первого и второго магнитного слоя записывалась в аналогичном виде. Для решения данной задачи используется декартова система координат, ось Oz которой перпендикулярна плоскости пленки. Циркулярно-поляризованное переменное магнитное поле \vec{h}_{xy} ориентировано в плоскости Oxy , а постоянное магнитное поле \vec{H}_0 направлено вдоль оси Oz . Кроме того в плоскости Oxy было ориентировано дополнительное слабое постоянное поле с компонентами H_{0x} , H_{0y} . Таким образом, для слоя ферромагнетика динамика намагниченности будет определяться тремя нелинейными обыкновенными дифференциальными уравнениями:

$$\frac{\partial m_{xi}}{\partial t} = -\frac{\gamma}{1 + \alpha^2} [(m_{yi} + \alpha m_{xi} m_{zi}) H_{ezi} - (m_{zi} - \alpha m_{yi} m_{xi}) H_{eyi} - \alpha (m_{yi}^2 + m_{zi}^2) H_{exi}], \quad (2)$$

$$\frac{\partial m_{yi}}{\partial t} = -\frac{\gamma}{1 + \alpha^2} [(m_{zi} + \alpha m_{yi} m_{xi}) H_{exi} - (m_{xi} - \alpha m_{zi} m_{yi}) H_{ezi} - \alpha (m_{zi}^2 + m_{xi}^2) H_{eyi}], \quad (3)$$

$$\frac{\partial m_{zi}}{\partial t} = -\frac{\gamma}{1 + \alpha^2} [(m_{xi} + \alpha m_{zi} m_{yi}) H_{eyi} - (m_{yi} - \alpha m_{xi} m_{zi}) H_{exi} - \alpha (m_{xi}^2 + m_{yi}^2) H_{ezi}], \quad (4)$$

где i – номер слоя ($i = 1, 2$) и компоненты эффективных полей равны:

$$H_{exi} = h_x + H_{0x} + H_{int xi} + H_{axi}, \quad (5)$$

$$H_{eyi} = h_y + H_{0y} + H_{int yi} + H_{ayi}, \quad (6)$$

$$H_{ezi} = H_{0z} - 4\pi M_{0i} m_{zi} + H_{int zi} + H_{azi}, \quad (7)$$

где $H_{int ji}$ – j -компоненты полей взаимодействия соседних слоев ($j = x, y, z$), H_{axi} – j -компоненты полей кубической анизотропии, M_{0i} – намагниченность насыщения i -го слоя. j -Компоненты полей взаимодействия соседних слоев найдены по следующим формулам

$$H_{int j1} = -\frac{J}{M_{01}} m_{j2}, \quad (8)$$

$$H_{int j2} = -\frac{J}{M_{02}} m_{j1}, \quad (9)$$

где J – константа межслойного взаимодействия.

Параметры слоев в работе варьировались, типичные их значения были следующими: $H_{0z} = 265$ Э; параметр диссипации $\alpha = 0.2$; намагниченности насыщения слоев $M_{01} = \frac{280}{4\pi}$ Гс, $M_{02} = \frac{275}{4\pi}$ Гс; частота переменного магнитного поля $F_0 = 500$ МГц; амплитуда переменного магнитного поля $h_0 = 20$ Э; константа поля кубической анизотропии $K = 100$ эрг/см³.

Таким образом, в данной работе задача сводится к численному решению системы 6 нелинейных дифференциальных уравнений (2)–(4). Система решается с помощью программы Scilab встроенным стандартным решателем ode.

ОПИСАНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Перейдем к описанию результатов численного решения задачи о магнитных колебаниях в пленке с двумя слоями ферромагнетика и тонкой немагнитной прослойкой между слоями, при приложении постоянного намагничивающего поля перпендикулярно слоям. В зависимости от величины константы взаимодействия слоев это могут быть системы с магнитостатическим [8] или обменным [9] типом связи между магнитными слоями. При моделировании учитывалось влияние слабых полей, приложенных в плоскости пленки, различных типов кубической анизотропии и величины константы взаимодействия между слоями на характер динамического поведения намагниченности в условиях, когда нормально намагничивающее постоянное поле по величине меньше поля насыщения слоев.

На рис. 1 показаны прецессионные портреты для компонент вектора намагниченности первого магнитного слоя m_{x1} , m_{y1} , полученные при разных значениях константы связи J между магнитными слоями. С увеличением константы межслойной связи J при относительно небольших ее значениях, прецессионный портрет претерпевает изменения, не изменяясь при этом кардинально. Суще-

ность изменения состоит в том, что сгущение, возникающее под действием поля межслойного взаимодействия, перемещается вдоль большого кольца в направлении часовой стрелки при росте J . Также происходит увеличение угла прецессии для параметрических портретов на рис. 1, что сказывается на общей ширине кольца. В ходе анализа возникает предположение, что поле межслойной связи влияет на время полного оборота магнитных моментов (рис. 1). Смещение малого сгущения внутри кольца фазовой траектории намагниченности вызвано тем, что глубина потенциальной энергетической ямы, возникающей от минимума энергии анизотропии, увеличивается из-за взаимодействия между магнитными слоями.

В диапазоне значений $J = 200\text{--}250 \text{ эрг} \cdot \text{см}^{-3}$ действия полей анизотропии и поля межслойной связи по порядку величины совпадают, что вызывает образование на портретах новых сгущений, которые, в свою очередь, в зависимости от значения J , могут накладываться со сгущениями поля анизотропии.

Начиная с $J = 300 \text{ эрг} \cdot \text{см}^{-3}$ (рис. 1б, 1г), кольцо прецессии второго порядка испытывает морфологические изменения. Ширина кольца начинает заметно увеличиваться, общий вид плавно переходит к новой форме. Дальнейшее увеличение константы межслойной связи J снижает влияние поля анизотропии на динамику намагниченности, выраженность сгущений на параметрических портретах уменьшается. Наконец большой круг прецессии становится монотонно заполненным небольшими кольцами. Такое поведение вектора намагниченности характерно для $J = 800 \text{ эрг} \cdot \text{см}^{-3}$: сгущения не проявляются, наблюдается равномерное заполнение большого круга прецессии малыми кольцами.

В ходе моделирования также было показано влияние различных факторов по отдельности на характер прецессии при постоянстве определенной совокупности условий. Для каждого изменяемого параметра была построена своя серия прецессионных портретов. Были подробно рассмотрены комбинации полей анизотропии и малых несимметричных полей при их совместном действии. Показано явление компенсации сгущений на прецессионном портрете, вызванное малыми несимметричными полями и полем кубической анизотропии [4].

В работе была выявлена зависимость характера нелинейного режима динамики намагниченности для пленок [111] от значения константы межслойного взаимодействия в случае небольшого значения константы анизотропии ($K = 7 \text{ эрг} \cdot \text{см}^{-3}$) в присутствии постоянных несимметричных полей H_{0x} , H_{0y} , приложенных вдоль Ox и Oy (рис. 2). На рис. 2 мы можем наблюдать следующие ситуации. Для рис. 2а поля межслойного взаимодействия и поля анизотропии создают глубокий минимум

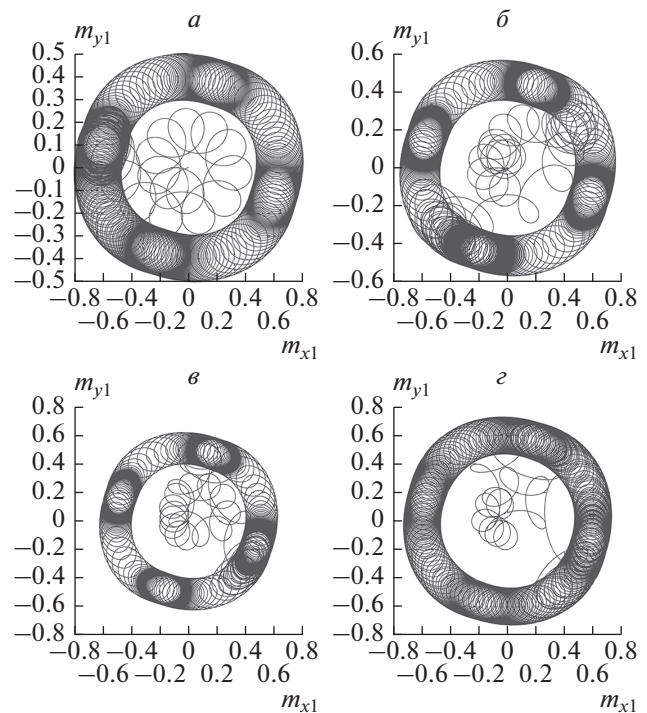


Рис. 1. Прецессионные портреты для 1-го слоя пленки при анизотропии типа [100] и изменении константы связи слоев: $J = 50$ (а); 180 (б); 300 (в); $600 \text{ эрг} \cdot \text{см}^{-3}$ (г).

потенциальной энергии в третьей четверти координатной плоскости, в которой вектор намагниченности окончательно застревает, что приводит к образованию малоамплитудной круговой прецессии [4]. На рис. 2б мы можем наблюдать промежуточное состояние: для слоя 1 минимум в третьей четверти является достаточно глубоким, чтобы вектор намагниченности не мог его покинуть, а для слоя 2 глубина потенциальной ямы достаточна, чтобы вызвать сильное сгущение на прецессионном портрете, но все-таки наблюдается прецессия положения равновесия. Для случая, показанного на рис. 2в и данной ориентации поля межслойного взаимодействия наблюдается прецессия положения равновесия в обоих слоях двухслойной ферромагнитной пленки.

Специфичность режима прецессии, показанного на рис. 2 при разных значениях константы межслойной связи J , может быть связана с тем, что вектор намагниченности для данного значения константы поля анизотропии ($K = 7 \text{ эрг} \cdot \text{см}^{-3}$) находится в состоянии равновесия на грани устойчивости. Влияние поля анизотропии приводит к образованию минимумов потенциальной энергии, в которые вектор намагниченности периодически скатывается, проводя там значительное время. Влияние поля межслойного взаимодействия обладает схожей природой с одним существенным из-

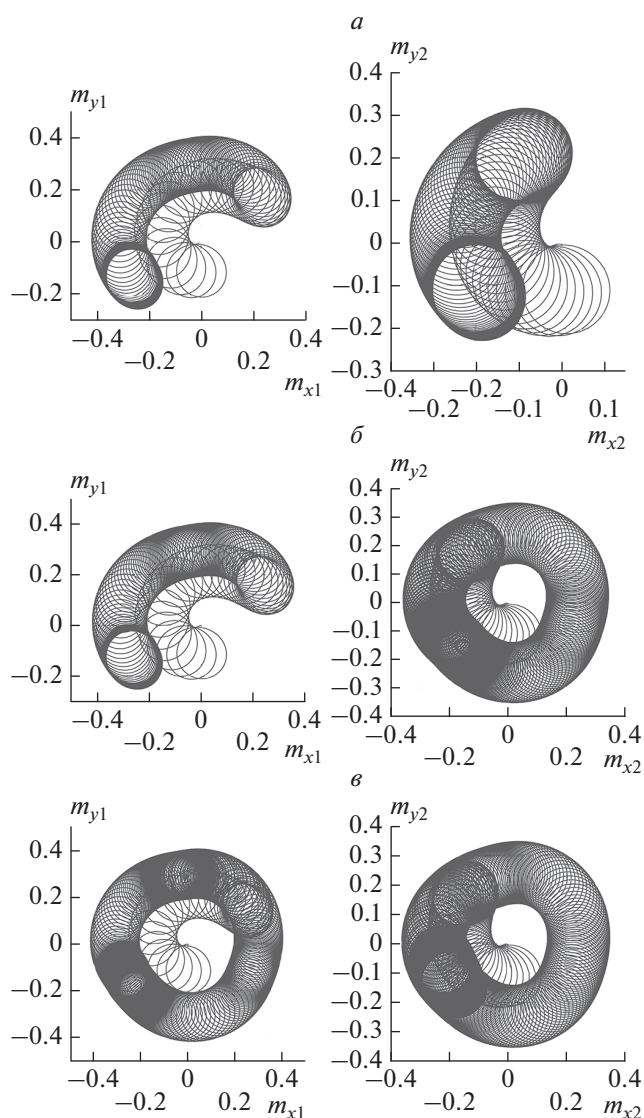


Рис. 2. Прецессионные портреты при анизотропии типа [111] под действием несимметричных полей $H_{0x} = -0.01$ Э, $H_{0y} = 0.01$ Э и изменении константы связи слоев: $J = -1$ (а); 0 эрг \cdot см $^{-3}$ (б); 1 эрг \cdot см $^{-3}$ (в). $K = 7$ эрг \cdot см $^{-3}$.

менением — количество локальных минимумов по большому кольцу прецессионного портрета сводится к существованию всего одного. Глубина данного минимума линейно зависит от константы поля межслойного взаимодействия J . Значения J и K являются сопоставимыми, в связи с чем можно утверждать о том, что и влияние полей межслойного взаимодействия и анизотропии будут одного порядка. Отрицательные значения константы J приводят к искажению и углублению минимумов энергии, связанных с полем анизотропии, поэтому прецессия второго порядка, скатываясь в такую

яму, вырождается в малоамплитудную круговую прецессию на рис. 2а.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Построены прецессионные портреты для двухслойных магнитных структур с магнитостатическим типом связи между слоями для трех видов ориентации поля кубической анизотропии. Было выявлено существенное влияние поля анизотропии и поля межслойного взаимодействия на динамику намагниченности пленки. При больших значениях константы межслойной связи влияние поля анизотропии на прецессионные портреты уменьшается вплоть до его полной компенсации. Обнаружен особый режим прецессии намагниченности для ориентации поля анизотропии [111], в котором существование прецессии положения равновесия зависит от направления поля межслойной связи.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 21-72-20048).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Claas A. // Eur. Phys. J. B. 2019. V. 92. Art. No. 120.
2. Власов В.С., Шавров В.Г., Щеглов В.И. // Радиотехн. и электрон. 2014. Т. 59. № 5. С. 482; Vlasov V.S., Shavrov V.G., Shcheglov V.I. // J. Commun. Technol. Electron. 2014. V. 59. No. 5. P. 441.
3. Плешев Д.А., Асадуллин Ф.Ф., Оганезова Н.А. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2019. Т. 83. № 7. С. 987; Pleshchev D.A., Asadullin F.F., Oganezova N.A. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2019. V. 83. No. 7. P. 901.
4. Власов В.С., Котов Л.Н., Шавров В.Г. и др. // Радиотехн. и электрон. 2012. Т. 57. № 5. С. 516; Vlasov V.S., Kotov L.N., Shavrov V.G. et al. // J. Commun. Technol. Electron. 2012. V. 57. No. 5. P. 453.
5. Власов В.С., Кирушев М.С., Котов Л.Н. и др. // Радиотехн. и электрон. 2013. Т. 58. № 9. С. 857; Vlasov V.S., Kirushev M.S., Kotov L.N. et al. // J. Commun. Technol. Electron. 2013. V. 58. P. 847.
6. Власов В.С., Котов Л.Н., Липина Е.С. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2013. Т. 77. № 10. С. 1459; Vlasov V.S., Kotov L.N., Lipina E.S. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2013. V. 77. No. 10. P. 1255.
7. Besse V., Golov A.V., Vlasov V.S. et al. // JMMM. 2020. V. 502. Art. No. 166320.
8. Семенов Д.И., Шутый А.М. // ФТТ. 2003. Т. 45. № 5. С. 877; Sementsov D.I., Shutyi A.M. // Phys. Solid State. 2003. V. 45. No. 5. P. 922.
9. Zhou J., Saha S., Luo Z. et al. // Phys. Rev. B. 2020. V. 101. No. 21. Art. No. 214434.

Investigation of nonlinear modes of magnetization in a two-layer ferromagnetic structure

I. E. Abramovski^{a, *}, V. S. Vlasov^a, D. A. Pleshev^{a, b}, L. N. Kotov^a, V. I. Shcheglov^c

^a Syktyvkar State University, Syktyvkar, Russia

^b Syktyvkar Forest Institute (branch) of the St. Petersburg State Forestry Engineering University, Syktyvkar, Russia

^c Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**e-mail: abramowsk-ivan@mail.ru*

The second order magnetization vector precession in a two-layer magneto-coupling structure is considered. The numerical solutions for magnetic subsystem dynamics of the two-layer film are obtained. Parametric portraits of the magnetization vectors motions are obtained in the case of the action of a combination of external asymmetric fields and internal anisotropy fields on the magnetization dynamics. The influence of the layer interaction constant to the character of parametric magnetization portraits is defined.