

05,13

Влияние электропроводности металлического экрана на характер распространения спиновых волн в двухслойных пленках ЖИГ

© А.С. Пташенко, С.А. Одинцов, С.Е. Шешукова, А.В. Садовников

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского,
Саратов, Россия

E-mail: andrey.po3@mail.ru

Поступила в Редакцию 18 апреля 2024 г.

В окончательной редакции 18 апреля 2024 г.

Принята к публикации 8 мая 2024 г.

Посвящена исследованию влияния электропроводности металлического экрана на характер распространения спиновых волн в двухслойной пленке, состоящей из железиттриевого граната. С использованием численного моделирования методом конечных элементов были получены дисперсионные характеристики для различных значений электропроводности металлического экрана. Выявлено, что уменьшение электропроводности металлического экрана приводит к уменьшению взаимодействия волн с ним, и с увеличением частоты и волнового числа характер распространения спиновых волн становится более похожим на случай распространения волн в обычной двухслойной пленке без металлического экрана. Полученные результаты могут быть использованы для разработки новых магнонных устройств с улучшенными характеристиками и возможностью управления процессами распространения спиновых волн, что открывает новые перспективы для развития магнонной электроники и спинтроники.

Ключевые слова: магноника, спиновые волны, многослойные волноводы, железиттриевый гранат, невзаимность.

DOI: 10.61011/FTT.2024.06.58248.16НН

1. Введение

В последние десятилетия многослойные пленки на основе ферромагнитных материалов привлекают значительное внимание научного сообщества в связи с постоянным развитием технологий создания магнитных структур на немагнитных подложках [1]. Магнитные тонкопленочные системы, включая одиночные, двойные и многослойные структуры, представляют собой смесь ферромагнитных (ФМ), антиферромагнитных (АФМ) и немагнитных (НМ) слоев различной толщины и расположения, привлекая особый интерес к многослойным структурам ФМ/НМ в последнее десятилетие [2].

Современный поиск новых методов использования спин-волновых сигналов для обработки информации стимулирует идеи о применении свойств невзаимности спиновых волн (СВ), распространяющихся в многослойных структурах [1]. В качестве основного материала для магноники широко используется железиттриевый гранат (ЖИГ) благодаря своей развитой технологии изготовления и низким потерям при распространении СВ. Тонкие пленки на основе ЖИГ могут служить основой для создания слоистых структур, таких как ЖИГ/металл, демонстрируя проявление эффекта невзаимности при изменении направления распространения СВ или ориентации внешнего поля подмагничивания. Двухслойные пленки, состоящие из слоев ЖИГ с разной намагниченностью, обладают рядом преимуществ по сравнению со структурами ЖИГ/металл за счет увеличения потерь на распространение [3]. Несмотря на известное затухание СВ при металлизации поверхности ферромагнитных

пленок [4,5], влияние электропроводности металла на это затухание ранее не исследовалось.

Исследование волноведущих структур на основе двухслойных ЖИГ пленок представляет значительный интерес, особенно с точки зрения их использования в качестве компонентов магнонных сетей. Особое внимание уделяется исследованию режимов распространения в магнонных микроволноводах, созданных из многослойных ферритовых пленок, поскольку эти структуры позволяют контролировать режимы интерференции и могут быть важными элементами для создания интерферометров типа Маха–Цендера [6]. Возможны также нелинейные режимы распространения сигнала в микроволноводах на основе тонких пленок ЖИГ, исследуемые с использованием различных методов [7–14]. Дополнительно, многослойные пленки могут использоваться для создания устройств с переключаемыми характеристиками и спин-трансферных устройств, что открывает новые возможности для создания энергоэффективных и высокоскоростных устройств для хранения и обработки информации [15–20].

В настоящей работе проведено исследование особенностей распространения сигнала в многослойной структуре, которая представляет собой многослойную пленку железиттриевого граната с металлическим экраном на поверхности. Рассматриваемая магнитная пленка состоит из двух слоев ферромагнетика с различной намагниченностью. Были изучены различные механизмы управления спектром спиновых волн при изменении электропроводности металлического экрана. С использованием математического моделирования на основе

метода конечных элементов была проанализирована трансформация спектров СВ, проявляющаяся в эффекте сдвига высокочастотной и низкочастотной полос спектра спиновых при изменении параметра структуры. Таким образом, использование особенностей спектров СВ в двухслойных ЖИГ пленках и методов управления свойствами СВ при металлизации структур имеет потенциал для проектирования магнитных сетей и создания перспективных магнитоэлектронных устройств.

2. Исследуемая структура

Для исследования влияния металлизации на характер распространения спиновых волн в рассматриваемой структуре рассмотрим математическую модель, позволяющую оценить электродинамические характеристики гиротропных структур, периодических по одному из пространственных направлений. Рассматриваемая структура представляет собой многослойную пленку ЖИГ $[\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}]$ с металлическим экраном на поверхности. Материал магнитной пленки состоит из двух слоев ферромагнетика с разной намагниченностью. Металлический экран располагается на расстоянии $\Delta d = 1 \mu\text{m}$ от поверхности магнитной пленки. Геометрия моделирования соответствует возбуждению поверхностных магнитостатических волн (ПМСВ), касательных к намагниченной пленке.

Для описания электродинамических характеристик решаются уравнения Максвелла для представленной на рис. 1 структуры с соответствующими граничными условиями. Периодические граничные условия Флоке (Periodic Boundary Condition, PBC) задаются на правой и левой границах расчетной области, что позволяет проводить расчет дисперсионных характеристик спиновых волн для первой приведенной зоны Бриллюэна. Они имеют вид

$$\mathbf{E}(x + L, y) = \mathbf{E}(x, y) \exp(-j\beta_y L),$$

где β_y — компонента волнового вектора вдоль оси y (продольное волновое число).

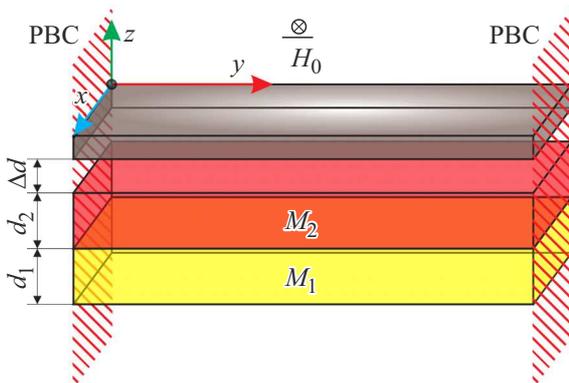


Рис. 1. Схематическое изображение исследуемой структуры.

3. Метод численного исследования

Для численного моделирования и расчета спектров электромагнитных волн использовался метод конечных элементов, основанный на решении системы уравнений Максвелла. В данном подходе спины в системе рассматриваются как свободные, не учитывается обменное взаимодействие. Предполагается, что компоненты электромагнитного поля зависят от частоты по гармоническому закону $e^{j\omega t}$, что позволяет решить уравнение второго порядка для вектора напряженности электрического поля \mathbf{E} :

$$\nabla(\hat{\mu}^{-1}\nabla E) - k^2\epsilon E = 0,$$

где $k = \omega/c$ — волновое число в вакууме, $\omega = 2\pi f$ — круговая частота, f — частота электромагнитной волны, $\epsilon = 14$ — эффективное значение диэлектрической проницаемости для слоя ЖИГ.

Тензор магнитной проницаемости каждого слоя задавался соответствующим электромагнитному описанию гиротропной среды [5]:

$$\hat{\mu}_{1,2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \mu_{1,2}(\omega) & -i\mu_{a1,2}(\omega) \\ 0 & i\mu_{a1,2}(\omega) & \mu_{1,2}(\omega) \end{bmatrix}$$

$$\mu_{1,2}(\omega) = \frac{\omega_H(\omega_H + \omega_{M1,2}) - \omega^2}{\omega_H^2 - \omega^2},$$

$$\mu_{a1,2}(\omega) = \frac{\omega_{M1,2}\omega}{\omega_H^2 - \omega^2},$$

где $\omega_{M1,2} = \gamma 4\pi M_{1,2}$, $\omega_H = \gamma H_0$, $\gamma = 2\pi \cdot 2.8 \text{ МГц/Ое}$ — гиромагнитное отношение в ЖИГ пленке, $M_{1,2}$ — намагниченность насыщения каждого слоя. Для моделирования распространения собственных волн в периодической структуре был рассмотрен один период структуры.

Сначала были получены дисперсионные характеристики для спиновых волн, распространяющихся в положительном и отрицательном направлениях оси y , путем решения аналитического уравнения из предыдущих исследований для двухслойной структуры без металлизированного экрана рис. 2 [21].

Для структуры с рис. 1, у которой один слой состоит из чистого ЖИГ с толщиной $d_1 = 6.9 \mu\text{m}$ и намагниченностью насыщения $4\pi M_1 = 1738 \text{ Ое}$ (ЖИГ 1), а второй слой — из ЖИГ с толщиной $d_2 = 8.9 \mu\text{m}$ и намагниченностью насыщения $4\pi M_2 = 904 \text{ Ое}$ (ЖИГ 2), был произведен расчет дисперсионных характеристик. Помимо эффекта отклонения одной из дисперсионных ветвей вследствие влияния металла вблизи волноводной структуры, при изменении электропроводности металлического экрана в ВЧ области спектра распространения СВ наблюдается постепенное снижение его влияния. В НЧ области наблюдается аналогичная динамика до определенного уровня, при электропроводности ниже $9e4 \text{ S/m}$ наблюдается изменение знака

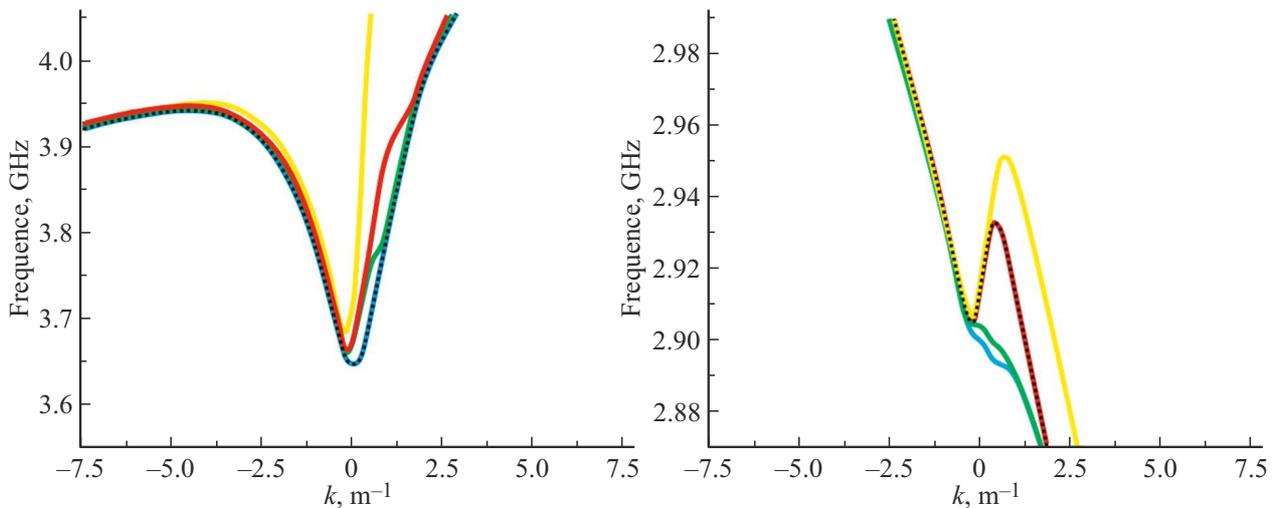


Рис. 2. Дисперсионные характеристики для структуры с металлическим экраном вблизи слоя с наименьшей намагниченностью при различных параметрах электропроводности металлического экрана: 59980000 S/m (желтая линия), 90000 S/m (красная линия), 37500 S/m (зеленая линия), 3750 S/m (синяя линия) и дисперсионная характеристики полученная в результате решения аналитического уравнения (черная пунктирная кривая).

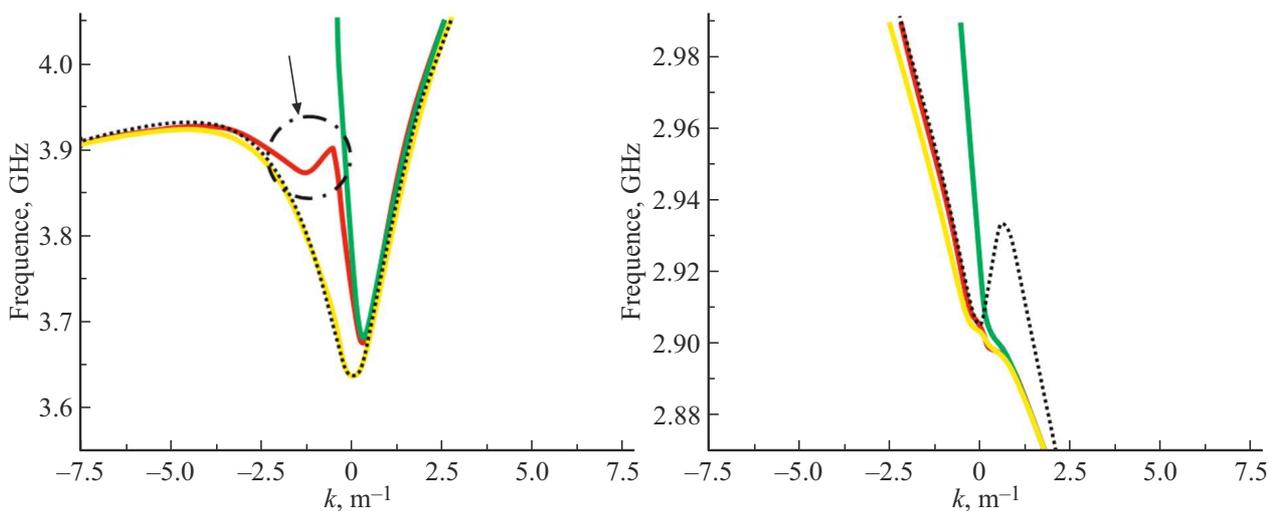


Рис. 3. Дисперсионные характеристики для структуры с металлическим экраном вблизи слоя с наибольшей намагниченностью при различных параметрах электропроводности металлического экрана: 59980000 S/m (желтая линия), 90000 S/m (красная линия), 37500 S/m (зеленая линия) и дисперсионная характеристики полученная в результате решения аналитического уравнения (черная пунктирная кривая).

групповой скорости при меньших k . Зависимость расположения металлического экрана на прямые и обратные спиновые волны более подробно исследовалось ранее рис. 3 [22].

Для структуры с рис. 1 со слоями толщиной $d_1 = 8.9 \mu\text{m}$ и $d_2 = 6.9 \mu\text{m}$, намагниченностью насыщения $4\pi M_1 = 904 \text{ Oe}$ (ЖИГ 1) и $4\pi M_2 = 1738 \text{ Oe}$ (ЖИГ 2). В ВЧ области наблюдается отклонение и возврат ветви обратной ПМСВ дисперсионной характеристики при уменьшении электропроводности металлического экрана, при этом возникает еще одна область перегиба ветви в области отмеченной стрелкой на рис. 3, при значении электропроводности экрана

равной $9e4 \text{ S/m}$. В НЧ области помимо влияния экрана на ветвь дисперсионной характеристики соответствующих прямых ПМСВ происходит и изменение характера распространения обратных спиновых волн, с уменьшением влияния экрана на характер распространения при уменьшении электропроводности металлического экрана.

Данные результаты указывают на значительное влияние электропроводности металлического экрана на характер распространения спиновых волн в многослойных структурах, что может быть полезным при проектировании магнитных устройств и схем для обработки информации.

4. Заключение

В настоящей работе было рассмотрено влияние электропроводности металлического экрана на характер распространения спиновых волн в двухслойной пленке на основе железиттриевого граната. Путем численного моделирования с использованием метода конечных элементов были получены дисперсионные характеристики для различных значений электропроводности металлического экрана. Исходя из полученных результатов, мы выявили, что уменьшение электропроводности металлического экрана приводит к уменьшению взаимодействия волн с ним. Причем, с увеличением частоты и волнового числа спиновой волны характер распространения спиновых волн становится более похожим на случай распространения волн в обычной двухслойной пленке без металлического экрана. Эти результаты имеют важное значение для дальнейших исследований в области магнитной электроники и спинтроники. Они могут быть использованы при проектировании магнитных устройств с улучшенными характеристиками и возможностью управления процессами распространения спиновых волн. Также они могут быть полезны при создании новых методов передачи и обработки информации на основе спиновых волн.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 23-79-30027.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] С.А. Никитов, А.Р. Сафин, Д.В. Калябин, А.В. Садовников, Е.Н. Бегинин, М.В. Логунов, М.А. Морозова, С.А. Одинцов, С.А. Осокин, А.Ю. Шараевская, Ю.П. Шараевский, А.И. Кирилук. УФН **190**, 1009 (2020).
- [2] I.V. Vetrova, M. Zelent, J. Solys, V.A. Gubanov, A.V. Sadovnikov, T. Scepka, J. Derer, R. Stoklas, V. Cambel, M. Mruczkiewicz. Appl. Phys. Lett. **118**, 212409 (2021).
- [3] А.Г. Веселов, С.Л. Высоцкий, Г.Т. Казаков, А.Г. Сухарев, Ю.А. Филимонов. Радиотехника и электроника **39**, 2067 (1994).
- [4] А.В. Кожевников. Дисс. канд. физ.-мат. наук. Влияние параметрических спиновых волн на дисперсию и затухание магнитостатических волн в пленках железиттриевого граната (2011).
- [5] A.G. Gurevich, G.A. Melkov. Magnetization Oscillations and Waves. CRC Press, London (1996).
- [6] А.А. Грачев, А.А. Мартышкин, С.Е. Шешукова, А.В. Садовников, С.А. Никитов. Электроника и микроэлектроника СВЧ **1**, 387 (2019).
- [7] П.Е. Зильберман, С.А. Никитов, А.Г. Тимирязев. Письма в ЖТФ **42**, 3, 82 (1985).
- [8] A.D. Boardman, S.A. Nikitov, N. Waby. Phys. Rev. B **48**, 13602 (1993).
- [9] M. Chen, M. Tsankov, J. Nash, C. Patton. Phys. Rev. Lett. **70**, 1707 (1993).
- [10] R.W. Damon, J.R. Eshbach. J. Phys. Chem. Solids **19**, 308 (1961).
- [11] T.W. O'Keeffe, R.W. Patterson. J. Appl. Phys. **49**, 4886 (1978).
- [12] S.N. Bajpai. J. Appl. Phys. **58**, 910 (1985).
- [13] M.A. Morozova, S.V. Grishin, A.V. Sadovnikov, D.V. Romanenko, Yu.P. Sharaevskii, S.A. Nikitov. Appl. Phys. Lett. **107**, 242402 (2015).
- [14] A.V. Chumak, P. Kabos, M. Wu, C. Abert, C. Adelman, A. Adeyeye, J. Akerman, F.G. Aliev, A. Anane, A. Awad. IEEE Transact. Magn. **58**, 6, 0800172 (2002). DOI: 10.1109/TMAG.2022.3149664
- [15] Ю.А. Юсипова. Изв. вузов. Электроника **24**, 2, 160 (2019).
- [16] П.В. Купцов. ФТТ **65**, 6, 943 (2023).
- [17] H. Suhl. J. Phys. Chem. Solids **1**, 209 (1957).
- [18] V.E. Demidov, M. Evelt, V. Bessonov, S.O. Demokritov, J.L. Prieto, M. Munoz, J. Ben Youssef, V.V. Naletov, G. de Loubens, O. Klein, M. Collet, P. Bortolotti, V. Cros, A. Anane. Sci. Rep. **6**, 32781 (2016).
- [19] U.-H. Hansen, V.E. Demidov, S.O. Demokritov. Appl. Phys. Lett. **94**, 252502 (2009).
- [20] A.V. Sadovnikov, E.N. Beginin, M.A. Morozova, Yu.P. Sharaevskii, S.V. Grishin, S.E. Sheshukova, S.A. Nikitov. Appl. Phys. Lett. **109**, 042407 (2016).
- [21] S.A. Odintsov, S.E. Sheshukova, S.A. Nikitov, E.H. Lock, E.N. Beginin, A.V. Sadovnikov. J. Magn. Magn. Mater. **546**, 168736 (2022).
- [22] А.С. Пташенко, С.А. Одинцов, Э.Г. Локк, А.В. Садовников. ФТТ **66**, 1 (2024).

Редактор Т.Н. Василевская

Продолжение публикации материалов Симпозиума см. в ФТТ No 7/23