

Микро- и наноэлектроника. Физика конденсированного состояния
Micro- and nanoelectronics. Condensed matter physics

УДК 537.613; 530.182; 622.4
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-4-55-64>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Эффекты невязимности при распространении спиновых волн в двухслойном магнетонном микроволноводе на основе пленок железо-иттриевого граната

С.А. Одинцов ^{1, @},
Э.Г. Локк ²,
Е.Н. Бегинин ¹,
А.В. Садовников ¹

¹ Саратовский национальный исследовательский государственный университет
им. Н.Г. Чернышевского, Саратов, 410012 Россия

² Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова
Российской академии наук, Московская область, Фрязино, 141120 Россия

@ Автор для переписки, e-mail: odinoff@gmail.com

Резюме

Цели. Эффекты невязимности спиновых волн могут проявляться в металлизированных пленках феррит-гранатов. В настоящее время актуальной задачей является исследование динамики спиновых волн в микро- и наноразмерных магнетонных пленках. Использование многослойных диэлектрических пленок железо-иттриевого граната (ЖИГ) обеспечивает проявление эффекта невязимности и в то же время дает большее преимущество по сравнению со слоистой структурой ЖИГ/металл ввиду значительно меньших спин-волновых потерь в двухслойной пленке ЖИГ, состоящей из слоев с различными значениями намагнетичности. Такие пленки могут найти применение в задачах магнетонной логики для создания управляемых интерферометров типа Маха – Цендера на основе принципов магнетоники. Цель настоящей работы – объединение концепции невязимного спин-волнового распространения сигнала и одновременного проявления эффектов, возникающих при распространении спиновых волн в микроволноводах, образованных пленками ЖИГ конечной ширины.

Методы. В работе используются экспериментальный метод микроволновой спектроскопии на основе векторного анализатора цепей и метод конечных разностей для численного моделирования дисперсионных характеристик спиновых волн в двухслойных магнетонных микроволноводах. Также использована аналитическая модель, в рамках которой получено дисперсионное уравнение на основе магнетостатического приближения.

Результаты. На основе измерений амплитудно-частотных и фазо-частотных характеристик показана возможность сосуществования двух частотных диапазонов для распространения спин-волнового сигнала в двухслойном магнетонном микроволноводе на основе пленки ЖИГ, образованной двумя слоями с различными значениями намагнетичности насыщения. Выявлены режимы невязимного распространения спин-волнового сигнала. С помощью численной модели исследованы механизмы формирования в спектре двухслойной структуры ширинных мод спиновых волн, образующихся вследствие конечных размеров микроволновода. Оценка трансформации спектра мод также проведена при использовании аналитической модели. Экспериментальные данные хорошо согласуются с результатами предложенных численной и аналитической моделей.

Выводы. Продемонстрирована возможность частотно-селективного распространения спиновых волн в магнонном микроволноводе, состоящем из двух слоев с различным значением величины намагниченности насыщения. Показано, что многомодовое распространение спиновых волн может осуществляться внутри двухслойной структуры в двух диапазонах частот. В то же время этот процесс сопровождается сильной невязимостью распространений спин-волнового сигнала, что проявляется в изменении амплитудно- и фазо-частотных характеристик при изменении направления внешнего магнитного поля на противоположное. Предложенная концепция двухслойного спин-волнового волновода может лежать в основе изготовления магнонных межсоединений и магнонных интерферометров с поддержкой многополосных режимов работы.

Ключевые слова: спиновые волны, невязимность, микроструктуры, волновод, магноника

• Поступила: 14.03.2022 • Доработана: 10.05.2022 • Принята к опубликованию: 27.06.2022

Для цитирования: Одинцов С.А., Локк Э.Г., Бегинин Е.Н., Садовников А.В. Эффекты невязимности при распространении спиновых волн в двухслойном магнонном микроволноводе на основе пленок железо-иттриевого граната. *Russ. Technol. J.* 2022;10(4):55–64. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-4-55-64>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Nonreciprocal propagation of spin waves in a bilayer magnonic waveguide based on yttrium-iron garnet films

Sergey A. Odintsov ^{1, @},
Edwin H. Lock ²,
Evgeniy N. Beginin ¹,
Alexander V. Sadovnikov ¹

¹ Saratov State University, Saratov, 410012 Russia

² Fryazino Branch, Institute of Radioengineering and Electronics, Russian Academy of Sciences, Moscow oblast, Fryazino, 141120 Russia

@ Corresponding author, e-mail: odinoff@gmail.com

Abstract

Objectives. Nonreciprocal spin wave effects can manifest themselves in metalized films of ferrite garnets. By studying the dynamics of spin waves in micro- and nano-scale magnetic films, the possibility of using multilayer dielectric films of yttrium iron garnet (YIG) to ensure the manifestation of the nonreciprocity effect is demonstrated. This approach offers advantages compared to the use of a layered YIG/metal structure due to significantly lower spin-wave losses in the two-layer YIG film consisting of layers with different values of magnetization. Such films can be used in logical elements to create controllable Mach–Zehnder interferometers based on magnonic principles. The purpose of this work is to reconcile the concept of nonreciprocal spin-wave propagation of a signal with the simultaneous manifestation of the effects arising from the propagation of spin waves in microwave guides formed by finite-width YIG films.

Methods. We used an experimental microwave spectroscopy method based on a vector network analyzer along with a finite difference method to perform a numerical simulation of the dispersion characteristics of spin waves in two-layer magnonic microwave guides. An analytical model was also used to obtain a dispersion equation based on the magnetostatic approximation.

Results. Based on measurements of the amplitude and phase responses, the possible coexistence of two frequency ranges for the propagation of a spin-wave signal in a two-layer magnon microwave guide based on a YIG film formed by two layers with different values of saturation magnetization was demonstrated. Regimes of nonreciprocal propagation of a spin-wave signal were revealed. A numerical model was used to study the formation mechanisms of spin wave modes in the spectrum of a two-layer structure formed due to the finite dimensions of the microwave guide. An analytical model was used to evaluate the transformation of the mode spectrum. The experimental data are in good agreement with the results of the proposed numerical and analytical models.

Conclusions. The possibility of frequency-selective propagation of spin waves in a magnon microwaveguide consisting of two layers with different saturation magnetization values is demonstrated. Multimode propagation of spin waves can occur inside a two-layer structure in two frequency ranges. At the same time, this process is accompanied by a strong nonreciprocity of spin-wave signal propagation, which manifests itself in a change in the amplitude and phase responses when the direction of the external magnetic field is reversed. The proposed two-layer spin-wave waveguide concept can be used in the manufacture of magnon interconnects and magnon interferometers with the support of multiband regimes of operation.

Keywords: spin waves, nonreciprocity, microstructures, waveguide, magnonics

• Submitted: 14.03.2022 • Revised: 10.05.2022 • Accepted: 27.06.2022

For citation: Odintsov S.A., Lock E.H., Beginin E.N., Sadovnikov A.V. Nonreciprocal propagation of spin waves in a bilayer magnonic waveguide based on yttrium-iron garnet films. *Russ. Technol. J.* 2022;10(4):55–64. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-4-55-64>

Financial disclosure: The authors have no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Магнитные тонкопленочные системы (МТС) используются для обработки сигналов [1], магнитной записи и хранения информации [2, 3] и нового применения метаматериалов [4]. Разнообразие МТС включает системы одиночных магнитных пленок, двойных магнитных пленок и многослойных магнитных пленок, состоящих из ферромагнитных (ФМ), антиферромагнитных и немагнитных (НМ) пленок различной толщины и расположения слоев, среди которых мультислои ФМ/НМ вызвали наибольший интерес в последнее десятилетие [5]. Изучение релаксационных процессов в магнитных спиновых системах является одной из интересных и актуальных задач. В частности, это связано с проводимыми в последнее время активными исследованиями и перспективами практического использования многослойных магнитопленочных структур.

При создании систем обработки информации на сверхвысоких частотах, в которых информация кодируется через амплитуду и фазу магнитоэлектрических спиновых волн (СВ) [6–8], распространяющихся в ферритовых пленках, важным является исследование дисперсии различных типов магнитоэлектрических СВ, что определяет характеристики таких устройств. В настоящее время активно развивается концепция магнонной логики, используемая

в большом числе магнонных элементов, таких как мажоритарные вентили, полусумматоры, логические элементы NOR, XOR [9]. Возможность создания таких элементов обусловлена линейными режимами интерференции СВ в магнонных микроволноводах. В частности, образующим блоком магнонных сетей является структура на основе интерферометра Маха – Цендера, демонстрирующего возможность как конструктивной, так и деструктивной интерференции различных мод СВ в выходной секции интерферометра [10]. Использование многослойных диэлектрических пленок железо-иттриевого граната (ЖИГ) обеспечивает проявление эффекта невзаимности и в то же время дает большее преимущество с хорошо известными слоистыми структурами ЖИГ/металл, ввиду значительно меньших спиновых потерь в двуслойной пленке ЖИГ, состоящей из слоев с различными значениями намагниченности. Ферромагнитные тонкие пленки ЖИГ обладают значительно меньшим динамическим затуханием СВ по сравнению с металлическими магнитными пленками, что показано даже для случая ЖИГ нанометровой толщины [20]. Такие пленки могут найти применение в задачах магнонной логики для создания управляемых интерферометров типа Маха – Цендера на основе принципов магнонники.

Динамика СВ в наноразмерных ФМ пленках была предметом исследований в последние

десятилетия [11]. Одно из перспективных направлений изучения – приложение СВ для устройств обработки сигналов, поскольку длина волны СВ короче, чем у электромагнитных волн в гигагерцовом диапазоне частот [8], что делает задачу миниатюризации магнонных устройств актуальной [12]. Диэлектрическая магнетика рассматривается как альтернатива концепциям полупроводниковых устройств обработки сигналов [14, 17–19]. В магнонных средах информация переносится СВ (или магнонами) вместо электронов. Таким образом, использование структурированного ЖИГ обеспечивает основу для вычислительной техники следующего поколения с низким уровнем энергопотребления [14, 21, 22]. Магнонный микроволновод является универсальным элементом взаимосвязи между магнонными функциональными блоками внутри магнонной сети [23, 24]. Боковые ограничения магнонного волновода [25, 26] являются внутренней особенностью, определяющей характеристики распространения СВ вдоль соединения. Одновременное использование боковых ограничений и многослойности структуры для распространения СВ может быть использовано для частотно- и пространственно-селективных режимов работы волновода.

Невзаимность СВ известна со времен работы Дамона и Эшбаха [8], где было предсказано, что амплитуда прецессии намагниченности поверхностных мод должна быть несимметричной относительно направления распространения. Это поведение хорошо известно и было экспериментально измерено в микро- и наноразмерных магнитных пленках с использованием, например, метода спектроскопии Мандельштама – Бриллюэна [27, 28]. Невзаимное поведение СВ уже исследовалось для ФМ пленок с различной магнитной анизотропией на поверхности [28–32], для пленок с межзонными магнонными переходами [33], для обменно-связанных пленок [34]. Кроме того, теоретически и экспериментально показано, что межфазное взаимодействие Дзялошинского – Мориа [37–39], индуцированное в сверхтонких слоях ФМ, покрытых пленками тяжелых металлов, заметно влияет на спектры СВ, вызывая невзаимность в дисперсионных характеристиках. Однако использование диэлектрических пленок ЖИГ дает большее преимущество по сравнению с металлическими пленками из-за значительно меньших спин-волновых потерь в ЖИГ.

С другой стороны, в контексте обработки данных, невзаимность СВ, которая может проявляться в фазовой, амплитудной или частотной зависимости направления распространения СВ, является мощным инструментом для возможных приложений в коммуникационных и логических устройствах [39–41]. Явления невзаимного распространения волн были

в центре внимания исследований фотонных и электронных структур. Было обнаружено, что такие структуры обеспечивают режимы работы в изоляторах, циркуляторах и гираторах [42, 43]. Точно так же невзаимные эффекты, проявляющиеся при распространении СВ, определяют функциональные режимы работы магнонных устройств [39, 44, 45]. При этом важно отметить, что для создания интерферометров типа Маха – Цендера определяющим будет исследование режимов распространения СВ в магнонном микроволноводе конечной ширины, изготовленном из многослойной ферритовой пленки.

В работе исследуется спин-волновая динамика в двухслойном магнонном волноводе с использованием численной модели, микромагнитного моделирования и метода экспериментального исследования на основе микроволновой спектроскопии. При помощи анализа магнитных свойств каждого слоя и их равновесных конфигураций прогнозируются оптимальные условия для увеличения коэффициента частотной невзаимности встречных СВ в конфигурации Деймона – Эшбаха, которые затем подтверждаются моделированием и могут быть измерены методом микроволновой спектроскопии для прототипа двуслойного микроволновода на основе ЖИГ. Предложенная концепция двухслойного спин-волнового волновода лежит в основе изготовления магнонных межсоединений и магнонных интерферометров с поддержкой многополосных режимов работы.

1. СТРУКТУРА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ РАСЧЕТ

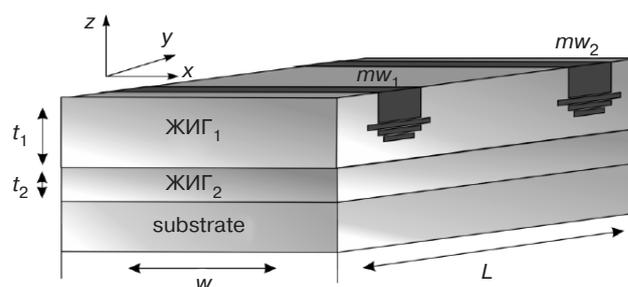


Рис. 1. Схематическое изображение двухслойного магнонного микроволновода с микроволновыми антеннами поверх одного из слоев

На рис. 1 показана схема исследуемой двухслойной спин-волноводной структуры. Для исследования были использованы монокристаллические ферромагнитные двухслойные ферритовые пленки ЖИГ $[Y_3Fe_5O_{12}]$ (НИИ Материаловедения, г. Зеленоград, Россия) размером $0.5 \times 7 \text{ мм}^2$, эпитаксиально выращенные на подложках галлий-гадолиниевого граната (ГГГ) $[Gd_3Ga_5O_{12}(\text{GGG})]$ (НИИ Материаловедения), плоскость которых совпадала с кристаллографической плоскостью (111). При создании пленки

на подложке из ГГГ сначала был выращен слой чистого ЖИГ толщиной 7 мкм с намагниченностью насыщения $4\pi M_1 = 1738$ Гс (этот слой будем называть ЖИГ₁), а на нем был выращен слой ЖИГ, легированный галлием и лантаном, толщиной 9 мкм с намагниченностью насыщения $4\pi M_2 = 904$ Гс (этот слой будем называть ЖИГ₂). Структура помещена в однородное внешнее магнитное поле $H_0 = 670$ Э, ориентированное вдоль положительного либо отрицательного направления оси x . Ширина обоих образцов $w = 500$ мкм, длина составила $L = 7$ мм. Входной и выходной микроволновые преобразователи (Микран, Россия) шириной 30 мкм были прикреплены к конструкции и обозначены на рис. 1 как « mw_1 » и « mw_2 ».

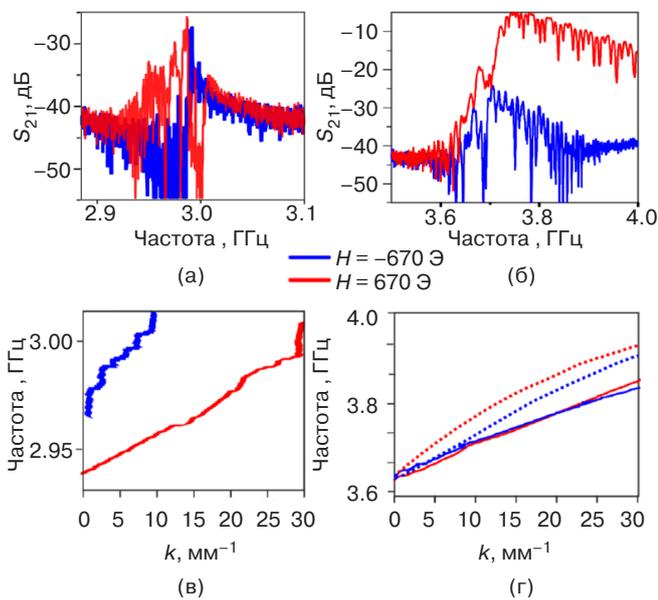


Рис. 2. Модуль коэффициента передачи и дисперсионные характеристики СВ на выходе структуры

С помощью векторного анализатора цепей E8362C PNA Vector Network Analyzer (Keysight Technologies, США) было проведено экспериментальное исследование характеристик СВ. На рис. 2а и рис. 2б показана частотная зависимость модуля коэффициента передачи $|S_{21}|$ в положительном направлении внешнего магнитного поля (красная кривая) и отрицательном направлении (синяя кривая), который был измерен в случае, когда выходной преобразователь расположен в конце структуры. Можно наблюдать две хорошо выраженные полосы частот: полоса низких частот (НЧ) (2.92–3.01 ГГц) на рис. 2а и полоса высоких частот (ВЧ) (3.61–4.0 ГГц) на рис. 2б. При изменении направления внешнего магнитного поля видно, как меняется ширина полос пропускания в НЧ и в ВЧ областях. Амплитуда СВ уменьшается в случае отрицательного направления внешнего магнитного поля из-за того, что микрополосковый

преобразователь располагался с одной стороны образца, а именно со стороны ЖИГ₁.

На рис. 2в и рис. 2г показаны измеренные дисперсионные характеристики СВ, распространяющихся вдоль двухслойной структуры при положительном (сплошная красная кривая) и отрицательном (сплошная синяя кривая) направлениях внешнего магнитного поля в разных частотных диапазонах: низкочастотном и высокочастотном, соответственно. Пунктирными линиями показаны результаты микромагнитного моделирования дисперсионной характеристики в ВЧ диапазоне. Изменение направления внешнего магнитного поля меняет характеристики распространения СВ в двухслойной структуре по причине разной величины насыщения намагниченности в слоях исследуемой структуры. Все измерения проводились при значении магнитного поля 670 Э.

2. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Была разработана аналитическая модель дисперсионного уравнения на основе магнитостатического приближения для ЖИГ волновода конечной ширины и дисперсии двухслойной пленки FM1/FM2, описанной в [25]. Использовано уравнение (3) из [19] с заменой $k_x^2 + k_y^2 - k$ и $k_z = \frac{n\pi}{\omega}$, $n = 1, 2, 3, \dots$, где n – индекс моды поперечной СВ. На рис. 3а представлены результаты решения дисперсионных уравнений СВ в двухслойной структуре для $w = 500$ мкм. С помощью численного моделирования метода конечных элементов было получено прямое решение системы уравнений Максвелла для трех первых мод СВ для двухслойной системы. Данный результат соответствует дисперсионной характеристике для рис. 3а, где каждая мода обозначена цветом: красная кривая соответствует $n = 1$; синяя соответствует $n = 2$; зеленая соответствует $n = 3$. Было обнаружено хорошее согласие между решением задачи на собственные моды и аналитическим подходом. Для нижней ветви дисперсионной характеристики моды выглядят так же, однако СВ распространяются в слое ЖИГ с меньшим насыщением намагниченности.

Для оценки явления невязности используем коэффициент невязности как $\kappa_{HF} = f_+ - f_-$, где f_+ – частота распространения СВ в положительном направлении оси y , а f_- – частота распространения СВ в отрицательном направлении оси y с тем же волновым числом k . Также определяется коэффициент невязности для нижней ветви дисперсионной характеристики $\kappa_{HF} = f_+ - f_-$. Оба коэффициента показаны на рис. 3б и рис. 3в для $w = 500$ мкм. Таким образом, с ростом волнового числа коэффициент невязности уменьшается для верхней ветви дисперсионной характеристики и увеличивается

для нижней. Это открывает возможности для создания волноведущих структур с функцией демультимплексирования сигналов, фильтрации и параллельной обработки данных в двух отдельных диапазонах частот.

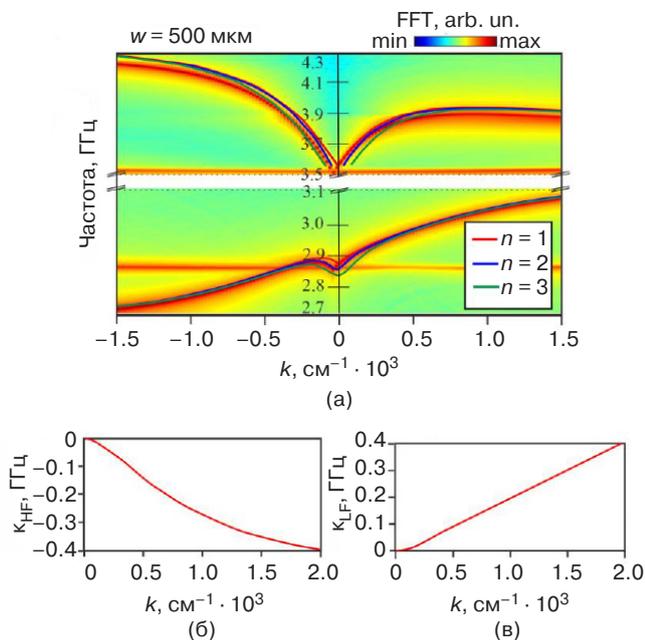


Рис. 3. (а) Дисперсионные характеристики, измеренные с помощью аналитической модели и в результате микромагнитного моделирования; (б) коэффициент невязности κ_{HF} для области ВЧ; (в) коэффициент невязности κ_{LF} для наименьших дисперсионных характеристик

Проведена оценка распределения внутреннего магнитного поля с помощью микромагнитного моделирования, которое было выполнено с использованием программного кода *MuMax3* [47]. Для этого рассмотрена модель, соответствующая экспериментальному образцу исследуемой структуры. Размер ячейки в системе составлял $4.00 \times 4.00 \times 1.25 \text{ мкм}^3$,

постоянная затухания $\alpha = 10^{-4}$. Материал, а также геометрия были выбраны в соответствии с параметрами, использованными в эксперименте. Разрешение расчетной области по оси Nz нумеровалось 12 слоями, что показано на схеме на рис. 4а. Система координат основана на глобальной системе координат, приведенной на рис. 1. Рис. 4б показывает результаты численного моделирования профилей внутренних магнитных полей в соответствующих слоях Nz и $w = 500 \text{ мкм}$. Видно, что при изменении ширины структуры внутренние магнитные поля критически уменьшаются на $Nz = 1-4$. Даже в верхних слоях внутренние магнитные поля испытывают влияние размагничивающих полей и границ структуры, что в свою очередь сильно влияет на спектры распространения СВ в этом типе конструкций.

Неоднородное распределение внутреннего магнитного поля приводит к более выраженному невязному поведению спин-волнового сигнала. В двухслойной системе, предложенной в [48], частотная невязность может включаться и выключаться простым переключением с антипараллельной на параллельную намагниченность без какого-либо вращения приложенного магнитного поля. Такое переключение можно даже контролировать и удобно осуществлять, применяя, например, спин-переносные или спин-орбитальные крутящие моменты через локальный ток. Кроме того, оба состояния – параллельное и антипараллельное – хорошо известны из применений гигантского магнитосопротивления и туннельного магнитосопротивления и могут быть настроены для обеспечения стабильности при остаточной намагниченности. Для настоящего двухслойного волновода такое переключение возможно при замене материала ЖИГ, например, на CoFeB [48, 49] и NiFe [50]. Тогда можно было бы реализовать дополнительную степень свободы для двухдиапазонной связи. С другой стороны, эта замена может привести к более высоким потерям распространения СВ

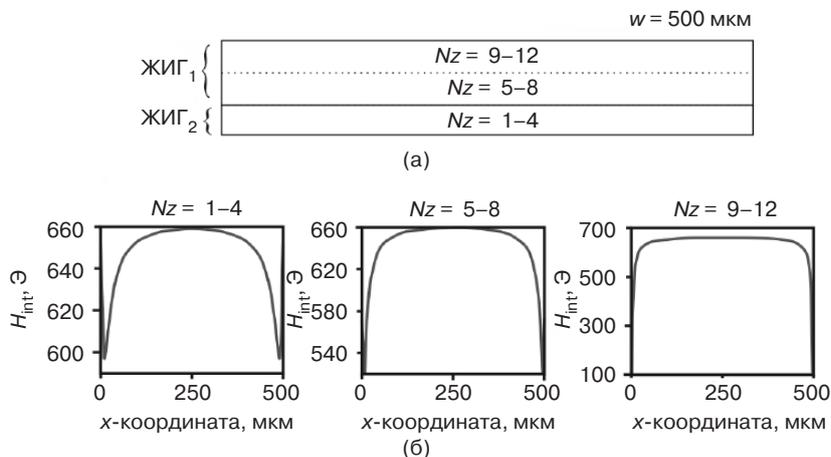


Рис. 4. (а) Схематичное изображение моделирования по оси z в *MuMax3*; (б) профили внутренних магнитных полей слоев для $w = 500 \text{ мкм}$

в металлических пленках. Таким образом, двухслойные волноводы ЖИГ демонстрируют способность имитировать широко изучаемые динамические свойства слоев ФМ-тяжелый металл и в то же время представляют собой простой способ управления величиной невязности посредством геометрии и равновесной конфигурации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведено исследование режимов распространения спин-волнового сигнала в связанной двухслойной ферромагнитной системе. Микроволновая спектроскопия использовалась для исследования характеристик передачи СВ в двухслойном ЖИГ волноводе. С помощью магнито-статического подхода и численного моделирования задачи на собственные значения было продемонстрировано, что дипольное взаимодействие между ФМ слоями, создаваемое динамическими намагниченностями, является заметным источником невязности в частотах СВ. Рассчитаны профили распределения величины внутреннего поля и коэффициент невязности для двуслойной структуры. Выявлена трансформация дисперсионных кривых, распространяющихся в двух противоположных направлениях. Показано, что двуслойные структуры поддерживают две полосы частот распространения СВ, при этом в магнетонном микроволноводе исследованы механизмы формирования в спектре двуслойной структуры ширинных мод СВ, образующихся вследствие конечных размеров микроволновода. При этом в спектре волн наблюдаются моды, соответствующие волнам с различным знаком групповой скорости.

Полученные результаты подтверждаются микромагнитным моделированием, которое демонстрирует возможность распространения СВ в низкочастотном и высокочастотном диапазонах двух слоев и локализацию мод СВ, наблюдаемых экспериментально. Эти результаты открывают новые пути изготовления невязных магнетонных устройств и побуждают к более глубокому изучению этого типа систем с целью оптимизации их конструкции в соответствии с желаемыми требованиями применения. При этом предложенная концепция двухслойного спин-волнового волновода может лежать в основе изготовления магнетонных межсоединений и магнетонных интерферометров с поддержкой многополосных режимов работы.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РТУ МИРЭА «Инновации в реализации приоритетных направлений развития науки и технологий», проект НИЧ 28/28.

Вклад авторов

С.А. Одинцов – проведение, обработка и анализ численных и экспериментальных исследований, написание статьи.

Э.Г. Локк – создание экспериментального макета.

Е.Н. Бегинин – разработка методики численного исследования.

А.В. Садовников – идея исследования, проведение экспериментального исследования, редакция статьи.

Authors' contributions

S.A. Odintsov – conducting, processing, and analyzing the numerical and experimental studies, writing the text of the article.

E.H. Lock – creating the experimental model.

E.N. Beginin – development of numerical research methodology.

A.V. Sadovnikov – development of the research concept, conducting the experimental studies, and editing the article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Amel'chenko M.D., Grishin S.V., Sharaevskii Y.P. Fast and slow electromagnetic waves in a longitudinally magnetized thin-film ferromagnetic metamaterial. *Tech. Phys. Lett.* 2019;45(12):1182–1186. <https://doi.org/10.1134/S1063785019120022>
2. Bajpai S.N. Excitation of magnetostatic surface waves: Effect of finite sample width. *J. Appl. Phys.* 1985;58(2): 910–913. <https://doi.org/10.1063/1.336164>
3. Beginin E., Kalyabin D., Popov P., Sadovnikov A., Sharaevskaya A., Stognij A., Nikitov S. 3D Magnonic Crystals. In: Gubbiotti G. (Ed.). *Three-Dimensional Magnonics*. Singapore: Jenny Stanford Publishing; 2019. P. 67–104. <https://doi.org/10.1201/9780429299155-3>
4. Belmeguenai M., Bouloussa H., Roussigne Y., Gabor M.S., Petrisor T., Tiusan C., Yang H., Stashkevich A., Chérif S.M. Interface Dzyaloshinskii-Moriya interaction in the interlayer antiferromagnetic-exchange coupled Pt/CoFeB/Ru/CoFeB systems. *Phys. Rev. B.* 2017;96(14):144402. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.96.144402>
5. Berger A., Supper N., Ikeda Y., Lengsfeld B., Moser A., Fullerton E.E. Improved media performance in optimally coupled exchange spring layer media. *Appl. Phys. Lett.* 2008;93(12):122502. <https://doi.org/10.1063/1.2985903>
6. Bernier N.R., Tóth L.D., Koottandavida A., Ioannou M.A., Malz D., Nunnenkamp A., Feofanov A.K., Kippenberg T.J. Nonreciprocal reconfigurable microwave optomechanical circuit. *Nat. Commun.* 2017;8(1):604. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-00447-1>
7. Camley R.E. Nonreciprocal surface waves. *Surface Sci. Rep.* 1987;7(3–4):103–187. [https://doi.org/10.1016/0167-5729\(87\)90006-9](https://doi.org/10.1016/0167-5729(87)90006-9)
8. Camley R., Celinski Z., Fal T., Glushchenko A., Hutchison A., Khivintsev Y., Kuanr B., Harward I., Veerakumar V., Zagorodnii V. High-frequency signal processing using magnetic layered structures. *J. Magn. Magn. Mater.* 2009;321(14):2048–2054. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2008.04.125>

9. Chumak A., et al. Roadmap on spin-wave computing. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2022;58(6). <https://doi.org/10.1109/TMAG.2022.3149664>
10. Balynsky M., Gutierrez D., Chiang H., et al. A magnetometer based on a spin wave interferometer. *Sci. Rep.* 2017;7(1):11539. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-11881-y>
11. Chumak A.V., Pirro P., Serga A.A., Kostylev M.P., Stamps R.L., Schultheiss H., Hillebrands B. Spin-wave propagation in a microstructured magnonic crystal. *Appl. Phys. Lett.* 2009;95(26):262508. <https://doi.org/10.1063/1.3279138>
12. Damon R., Eshbach J. Magnetostatic modes of a ferromagnet slab. *J. Phys. Chem. Solids*. 1961;19(3–4):308–320. [https://doi.org/10.1016/0022-3697\(61\)90041-5](https://doi.org/10.1016/0022-3697(61)90041-5)
13. Demidov V.E., Kostylev M.P., Rott K., Krzytsteczko P., Reiss G., Demokritov S.O. Excitation of microwaveguide modes by a stripe antenna. *Appl. Phys. Lett.* 2009;95(11):112509. <https://doi.org/10.1063/1.3231875>
14. Demokritov S.O. Magnons. In: Zang J., Cros V., Hoffmann A. (Eds.). *Topology in Magnetism*. Springer Series in Solid-State Sciences. 2018. V. 192. P. 299–334. https://doi.org/10.1007/978-3-319-97334-0_10
15. Di K., Lim H.S., Zhang V.L., Ng S.C., Kuok M.H. Spin-wave nonreciprocity based on interband magnonic transitions. *Appl. Phys. Lett.* 2013;103(13):132401. <https://doi.org/10.1063/1.4822095>
16. Dzyaloshinsky I. A thermodynamic theory of “weak” ferromagnetism of antiferromagnetics. *J. Phys. Chem. Solids*. 1958;4(4):241–255. [https://doi.org/10.1016/0022-3697\(58\)90076-3](https://doi.org/10.1016/0022-3697(58)90076-3)
17. Evelt M., Demidov V.E., Bessonov V., Demokritov S.O., Prieto J.L., Munoz M., Ben Youssef J., Naletov V.V., de Loubens G., Klein O., Collet M., Garcia-Hernandez K., Bortolotti P., Cros V., Anane A. High-efficiency control of spin-wave propagation in ultra-thin yttrium iron garnet by the spin-orbit torque. *Appl. Phys. Lett.* 2016;108(17):172406. <https://doi.org/10.1063/1.4948252>
18. Fert A., Levy P.M. Role of anisotropic exchange interactions in determining the properties of spin-glasses. *Phys. Rev. Lett.* 1980;44(23):1538–1541. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.44.1538>
19. Gallardo R., Schneider T., Chaurasiya A., Oelschlagel A., Arekapudi S., Roldán-Molina A., Hübner R., Lenz K., Barman A., Fassbender J., Lindner J., Hellwig O., Landeros P. Reconfigurable spin-wave nonreciprocity induced by dipolar interaction in a coupled ferromagnetic bilayer. *Phys. Rev. Applied*. 2019;12(3):034012. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.12.034012>
20. Gladii O., Haidar M., Henry Y., Kostylev M., Bailleul M. Frequency nonreciprocity of surface spin wave in permalloy thin films. *Phys. Rev. B*. 2016;93(5):054430. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.93.054430>
21. Gurevich A.G., Melkov G.A. *Magnetization Oscillations and Waves*. CRC Press; 1996. 464 p.
22. Hartman G.C., Fitch R., Zhuang Y. Nonreciprocal magnetostatic wave propagation in micro-patterned NiFe thin films. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*. 2014;24(7):484–486. <https://doi.org/10.1109/LMWC.2014.2316260>
23. Hillebrands B. Spin-wave calculations for multilayered structures. *Phys. Rev. B*. 1990;41(1):530–540. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.41.530>
24. Jamali M., Smith A.K., Wang J.-P. Nonreciprocal behavior of the spin pumping in ultra-thin film of CoFeB. *J. Appl. Phys.* 2016;119(13):133903. <https://doi.org/10.1063/1.4945028>
25. Khalili Amiri P., Rejaei B., Vroubel M., Zhuang Y. Nonreciprocal spin wave spectroscopy of thin Ni–Fe stripes. *Appl. Phys. Lett.* 2007;91(6):062502. <https://doi.org/10.1063/1.2766842>
26. Khitun A., Bao M., Wang K.L. Magnonic logic circuits. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2010;43(26):264005. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/43/26/264005>
27. Kruglyak V.V., Demokritov S.O., Grundler D. Magnonics. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2010;43(26):264001. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/43/26/264001>
28. Lan J., Yu W., Wu R., Xiao J. Spin-wave diode. *Phys. Rev. X*. 2015;5(4):041049. <https://doi.org/10.1103/PhysRevX.5.041049>
29. Lenk B., Ulrichs H., Garbs F., Munzenberg M. The building blocks of magnonics. *Phys. Rep.* 2011;507(4–5):107–136. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2011.06.003>
30. Moriya T. New mechanism of anisotropic superexchange interaction. *Phys. Rev. Lett.* 1960;4(5):228–230. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.4.228>
31. Mruczkiewicz M., Graczyk P., Lupo P., Adeyeye A., Gubbiotti G., Krawczyk M. Spin-wave nonreciprocity and magnonic band structure in a thin permalloy film induced by dynamical coupling with an array of Ni stripes. *Phys. Rev. B*. 2017;96(10):104411. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.96.104411>
32. Mruczkiewicz M., Krawczyk M., Gubbiotti G., Tacchi S., Filimonov Y.A., Kalyabin D.V., Lisenkov I.V., Nikitov S.A. Nonreciprocity of spin waves in metallized magnonic crystal. *New J. Phys.* 2013;15(11):113023. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/15/11/113023>
33. Mruczkiewicz M., Pavlov E.S., Vysotsky S.L., Krawczyk M., Filimonov Y.A., Nikitov S.A. Observation of magnonic band gaps in magnonic crystals with nonreciprocal dispersion relation. *Phys. Rev. B*. 2014;90(17):174416. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.90.174416>
34. Высоцкий С.Л., Казаков Г.Т., Маряхин А.В., Филимонов Ю.А. Объемные магнитостатические волны в обменно-связанных ферритовых пленках. *ЖТФ*. 1998;68(7):97–110. [Vysotskii S.L., Kazakov G.T., Maryakhin A.V. Magnetostatic volume waves in exchange-coupled ferrite films. *Tech. Phys.* 1998;43(7):834–845. <https://doi.org/10.1134/1.1259081>]
35. Neusser S., Grundler D. Magnonics: Spin waves on the nanoscale. *Adv. Mater.* 2009;21(28):2927–2932. <https://doi.org/10.1002/adma.200900809>
36. O’Keeffe T.W., Patterson R.W. Magnetostatic surface-wave propagation in finite samples. *J. Appl. Phys.* 1978;49(9):4886–4895. <https://doi.org/10.1063/1.325522>
37. Reiskarimian N., Krishnaswamy H. Magnetic-free non-reciprocity based on staggered commutation. *Nat. Commun.* 2016;7:11217. <https://doi.org/10.1038/ncomms11217>

38. Sadovnikov A.V., Beginin E.N., Sheshukova S.E., Sharaevskii Y.P., Stognij A.I., Novitski N.N., Sakharov V.K., Khivintsev Y.V., Nikitov S.A. Route toward semiconductor magnonics: Light-induced spin-wave nonreciprocity in a YIG/GaAs structure. *Phys. Rev. B*. 2019;99(5):054424. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.99.054424>
39. Sadovnikov A.V., Grachev A.A., Odintsov S.A., Martyshkin A.A., Gubanov V.A., Sheshukova S.E., Nikitov S.A. Neuromorphic calculations using lateral arrays of magnetic microstructures with broken translational symmetry. *JETP Letters*. 2018;108(5):312–317. <https://doi.org/10.1134/S0021364018170113>
40. Sadovnikov A.V., Grachev A.A., Sheshukova S.E., Sharaevskii Y.P., Serdobintsev A.A., Mitin D.M., Nikitov S.A. Magnon straintronics: Reconfigurable spin-wave routing in strain-controlled bilateral magnetic stripes. *Phys. Rev. Lett.* 2018;120(25):257203. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.120.257203>
41. Sadovnikov A.V., Odintsov S.A., Beginin E.N., Sheshukova S.E., Sharaevskii Y.P., Nikitov S.A. Toward nonlinear magnonics: Intensity-dependent spin-wave switching in insulating sidecoupled magnetic stripes. *Phys. Rev. B*. 2017;96(14):144428. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.96.144428>
42. Sander D., Valenzuela S.O., Makarov D., Marrows C.H., Fullerton E.E., Fischer P., McCord J., Vavassori P., Mangin S., Pirro P., Hillebrands B., Kent A.D., Jungwirth T., Gutfleisch O., Kim C.G., Berger A. The 2017 magnetism roadmap. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2017;50(36):363001. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/aa81a1>
43. Shen Z., Zhang Y.-L., Chen Y., Sun F.-W., Zou X.-B., Guo G.-C., Zou C.-L., Dong C.-H. Reconfigurable optomechanical circulator and directional amplifier. *Nat. Commun.* 2018;9(1):1797. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04187-8>
44. Sounas D., Alù A. Non-reciprocal photonics based on time modulation. *Nature Photon.* 2017;11:774–783. <https://doi.org/10.1038/s41566-017-0051-x>
45. Suess D. Multilayer exchange spring media for magnetic recording. *Appl. Phys. Lett.* 2006;89(11):113105. <https://doi.org/10.1063/1.2347894>
46. Tacchi S., Gruszecki P., Madami M., Carlotti G., Klos J., Krawczyk M., Adeyeye A. Universal dependence of the spin wave band structure on the geometrical characteristics of two-dimensional magnonic crystals. *Sci. Rep.* 2015;5:10367. <https://doi.org/10.1038/srep10367>
47. Vansteenkiste A., Leliaert J., Dvornik M., Helsen M., Garcia-Sanchez F., Waeyenberge B.V. The design and verification of MuMax3. *AIP Advances*. 2014;4(10):107133. <https://doi.org/10.1063/1.4899186>
48. Vetrova I.V., Zelent M., Šoltýs J., Gubanov V.A., Sadovnikov A.V., Šcepka T., Dérer J., Stoklas R., Cambel V., Mruzckiewicz M. Investigation of self-nucleated skyrmion states in the ferromagnetic/nonmagnetic multilayer dot. *Appl. Phys. Lett.* 2021;118(21):212409. <https://doi.org/10.1063/5.0045835>
49. Vogel M., Chumak A.V., Waller E.H., Langner T., Vasyuchka V.I., Hillebrands B., Freymann, G. Optically reconfigurable magnetic materials. *Nature Phys.* 2015;11(6):487–491. <https://doi.org/10.1038/nphys3325>
50. Wang X.S., Zhang H.W., Wang X.R. Topological magnonics: A paradigm for spin-wave manipulation and device design. *Phys. Rev. Applied*. 2018;9(2):024029. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.9.024029>

Об авторах

Одинцов Сергей Александрович, аспирант, младший научный сотрудник лаборатории «Магнитные метаматериалы» Саратовского национального исследовательского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского (410012, Россия, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83), победитель II Всероссийского научного конкурса «Инновации в реализации приоритетных направлений развития науки и технологий». E-mail: odinoff@gmail.com. Scopus Author ID 57192873555, ResearcherID P-2795-2017, SPIN-код РИНЦ 3874-1140, <https://orcid.org/0000-0001-9664-6997>

Локк Эдвин Гарриевич, д.ф.-м.н., заведующий лабораторией исследования СВЧ свойств ферромагнетиков Фрязинского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук (141120, Россия, Московская область, г. Фрязино, пл. Введенского, д. 1). E-mail: edwin@ms.ire.rssi.ru. Scopus Author ID 6603875313, ResearcherID C-5325-2012, SPIN-код РИНЦ 1030-4543, <https://orcid.org/0000-0003-0635-7687>

Бегинин Евгений Николаевич, к.ф.-м.н., заведующий кафедрой нелинейной физики Саратовского национального исследовательского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского (410012, Россия, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83). E-mail: egbegin@gmail.com. Scopus Author ID 24722705200, ResearcherID D-5766-2013, SPIN-код РИНЦ 2335-8660, <https://orcid.org/0000-0001-7138-8282>

Садовников Александр Владимирович, к.ф.-м.н., доцент кафедры физики открытых систем Саратовского национального исследовательского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского (410012, Россия, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83). E-mail: sadovnikovav@gmail.com. Scopus Author ID 36683238600, ResearcherID F-6183-2012. SPIN-код РИНЦ 8124-6029. <https://orcid.org/0000-0002-8847-2621>

About the authors

Sergey A. Odintsov, Postgraduate Student, Junior Researcher, Laboratory Management Magnetic Metamaterials, Saratov State University (83, Astrakhanskaya ul., Saratov, 410012 Russia). E-mail: odinoff@gmail.com. Scopus Author ID 57192873555, ResearcherID P-2795-2017, RSCI SPIN-code 3874-1140, <https://orcid.org/0000-0001-9664-6997>

Edwin H. Lock, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Head of the Laboratory of Microwave Properties of Ferromagnetics, Fryazino Branch, Institute of Radioengineering and Electronics, Russian Academy of Science (1, Vvedenskogo pl., Moscow oblast, Fryazino, 141120 Russia). E-mail: edwin@ms.ire.rssi.ru. Scopus Author ID 6603875313, ResearcherID C-5325-2012, RSCI SPIN-code 1030-4543, <https://orcid.org/0000-0003-0635-7687>

Evgeniy N. Beginin, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Head of the Department of Nonlinear Physics, Saratov State University (83, Astrakhanskaya ul., Saratov, 410012 Russia). E-mail: egbegin@gmail.com. Scopus Author ID 24722705200, ResearcherID D-5766-2013, RSCI SPIN-code 2335-8660, <https://orcid.org/0000-0001-7138-8282>

Alexander V. Sadovnikov, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Department of Open Systems Physics, Saratov State University (83, Astrakhanskaya ul., Saratov, 410012 Russia). E-mail: sadovnikovav@gmail.com. Scopus Author ID 36683238600, ResearcherID F-6183-2012, RSCI SPIN-code 8124-6029, <https://orcid.org/0000-0002-8847-2621>