УДК 537.613:537.622.4:537.621.4:537.876:530.182

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ УСТРОЙСТВА ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ НА ПРИНЦИПАХ МАГНОННОЙ СТРЕЙНТРОНИКИ: ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОМ МАНДЕЛЬШТАМ-БРИЛЛЮЭНОВСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

© 2021 г. А. В. Садовников^{1, 2, *}, С. А. Никитов^{1, 2}

 $^{1}\Phi$ едеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова Российской академии наук, Саратовский филиал, Саратов, Россия

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

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

**E-mail: SadovnikovAV@gmail.com* Поступила в редакцию 09.12.2020 г. После доработки 25.01.2021 г.

Принята к публикации 26.02.2021 г.

Методами мандельштам-бриллюэновской спектроскопии магнитных материалов с пространственным и частотным разрешением показана возможность управления спин-волноводными режимами распространения сигнала деформации в латеральных массивах магнонно-кристаллических структур с пьезоэлектрическим слоем. Продемонстрирована возможность управления дипольной спинволновой связью в латеральном массиве ферромагнитных полосок с помощью создания локальных деформаций в области локализации спин-волновых возбуждений. Показано, что при изменении абсолютной величины и знака электрического поля оказывается возможным эффективное управление свойствами распространяющихся спиновых волн и пространственным распределением интенсивности динамической намагниченности в латеральной структуре на частотах, находящихся в спектре поверхностных магнитостатических волн.

10.31857/\$0367676521060247

введение

В последнее время все больший интерес представляет исследование энергоэффективных методов управления свойствами распространяющихся спиновых волн [1, 2]. Устройства магноники рассматриваются как альтернатива модулям, осуществляющим логические операции на основе элементов полупроводниковой микроэлектроники, основанной на использовании заряда носителей тока (электронов или дырок) [3–5]. При этом использование спина носителей тока и спин-волновых возбуждений позволяет создать устройства электроники следующего поколения - диэлектрической магноники и спинтроники - с существенно улучшенными параметрами быстродействия, энергопотребления. меньшими пространственными размерами элементов [2, 6-8]. Кванты спиновых волн – беззарядовые квазичастицы магноны, распространяющиеся в магнитных материалах, могут использоваться в системах обработки информационных сигналов с низким энергопотреблением, при этом спиновые волны могут иметь длины волн от десятков нанометров до единиц миллиметров и могут возбуждаться в частотном диапазоне от единиц гигагерц (для ферро и ферримагнетиков) и до десятков терагерц (для антиферромагнитных структур). В то же время развитие технологических процессов изготовления планарных интегральных мультиферроидных структур "феррит-сегнетоэлектрик" или "феррит-пьезоэлектрик", демонстрирующих перестройку при изменении величины приложенного внешнего постоянного электрического поля, оказывается возможным интеграцию новых научных направлений в физики конденсированного состояния, таких как магноника и стрейнтроника [9]. Бурному росту числа исследований свойств магнонов в последнее десятилетие способствовало несколько причин: появление новых технологий, позволяющий взаимодействовать с магнонами на наномасштабах; открытие ряда физических явлений, таких как эффект спиновой накачки и эффект переноса спинового момента и необходимость создания альтернативы КМОП (комплементарная структура металл-оксид-полупроводник) технологии, достигшей на данный момент

фундаментальных ограничений [10]. Управление электрическим полем свойствами магнонов представляется одним из наиболее интересных физических механизмов энергоэффективного управление спиновыми волнами [11–18], поскольку магноны позволяют передавать и обрабатывать информацию без джоулевых потерь и длина свободного пробега магнонов обычно на несколько порядков больше, чем длина диффузии спинов. При этом волновая природа спиновых волн и их нелинейные свойства обеспечивают возможность применения более эффективных подходов к обработке данных, открывая возможность создания различных устройств магнонной логики [14-18]. Деформация в магнитной среде может создаваться локально статическими механическими деформациями, локальным нагревом или электрическим полем, действующим на одну из фаз композитной магнонной гетероструктуры, которая содержит магнитную и пьезоэлектрическую фазы. Вызванные деформацией физические эффекты в магнитных структурах могут быть использованы для создания энергоэффективной сложной двумерной и трехмерной топологии магнонных устройств и гетероструктур на основе мультиферроидных материалов. В настоящей работе показано, как использование идей магнонной стрейнтроники для различного класса спин-волноводных структур позволяет создавать системы магнонной логики с одновременным управлением электрическими и магнитными полями.

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ОБРАЗЦОВ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕТА

Для проведения исследований были разработаны две планарные продольно-нерегулярные ферритовые структуры (рис. 1), представляющие собой латерально расположенные пленки железо-иттриевого граната (ЖИГ) толщиной t = 10 мкм и намагниченностью насыщения $4\pi M_0 = 1750$ Гс, при этом в качестве референсной структуры использовались латеральные пленки шириной w = 500 мкм с зазором d = 40 мкм между ними, а в качестве магнонно-кристаллической структуры использовались магнонные волноводы с канавками глубиной 1 мкм, периодически повторяющиеся в направлении оси y с периодом D = 200 мкм. Магнонные структуры были изготовлены методом прецизионного лазерного скрайбирования с помощью системы лазерной резки на базе волоконного лазера СПЛМ "МиниМаркер2-20А4" [18] из монокристаллической пленки ЖИГ, выращенной методами жидкофазной эпитаксии. На верхней поверхности пьезоэлектрического керамического слоя из титаната цирконата свинца (PZT) с размерами $550 \times 4000 \times 200$ мкм³ размещен электрод из хрома толщиной 1 мкм, который не оказывает значи-



Рис. 1. Схема эксперимента и исследуемые структуры: референсная латеральная структура (a) и магнонно-кристаллическая структура (δ).

тельного влияния на распространение спиновых волн в микроволноводах. На другой стороне РZT были напылены электроды из хрома, толщиной 200 нм в форме трапеций для улучшения пьезомагнитного взаимодействия, расположенные над микроволноводами S1 и S2. Отдельно к каждому из электродов в эксперименте прикладывалось напряжение величиной $V_{1, 2}$. В эксперименте эффективная механическая связь между микроволноводами и PZT слоем была достигнута с помощью использования двухкомпонентного эпоксидного тензометрического клея (OMEGA Engineering, Inc. TT300) [18].

Структура помещалась во внешнее магнитное поле $H_0 = 1300$ Э. Для возбуждения поверхностных магнитостатических волн (ПМСВ) использовалась микрополосковая антенна (МПА), выполненная на подложке Al_2O_3 толщиной 0.25 мм, длиной 3 мм, шириной 30 мкм. Система координат, взаимная ориентация магнитного поля и МПА показаны на рис. 1. МПА помещалась во входной секции магнонного волновода S1.

На входную МПА подавались СВЧ-импульсы мощности $P_{in} = -20$ дБмВт, с частотой несущей



Рис. 2. Пространственное распределение $I_{\text{HPC}}(y, x)$ в магнонной структуре на частоте входного сигнала f = 5.605 ГГц и величине внешнего магнитного поля $H_0 = 1300$ Э.

f = 5.605 ГГц и длительностью $t_p = 100$ нс. Для исключения разогрева волновода СВЧ-сигналом период повторения импульсов устанавливался равным T = 2 мкс. Прецессия вектора намагниченности при возбуждении спиновых волн происходит во внешнем эффективном магнитном поле, которое в первую очередь определяется анизотропией формы магнитной структуры и латеральными размерами.

Исследование спин-волнового транспорта с получением информации об одновременно временных, пространственных и частотных характеристиках сигнала в латеральных топологиях магнонных структур проводилось с использованием метода мандельштам-бриллюэновской спектроскопии (МБС) в конфигурации квазиобратного рассеяния [20]. В основе последнего лежит эффект неупругого рассеяния света на когерентно возбуждаемых магнонах. Представляет интерес развитие методики исследования магнонных структур на основе метода МБС при управлении свойствами спиновых волн путем приложения электрического напряжения к слою пьезоэлектрика. Известно, что глубина проникновения света с длиной волны 532 нм в пленку ЖИГ составляет величину около 2—3 мкм, что является достаточным для получения сигнала с поверхности пленки. Пространственновременное распределение амплитуды высокочастотной намагниченности m(t, y, x) ПМСВ исследовалось методом МБС при сканировании сфокусированного лазерного пучка диаметром 25 мкм по поверхности волновода и измерением частотного спектра и интенсивности неупругого рассеяния света (НРС) $I_{HPC}(y, x) \approx \int_{0}^{T} |\vec{m}(t, y, x)|^{2} dt$. Сканирование выполнялось с шагом 25 мкм вдоль оси *x* и 50 мкм вдоль оси *v*.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Возбуждение ПМСВ происходило в диапазоне частот от $f_{\perp} = \gamma \sqrt{H_0 (H_0 + 4\pi M_0)} = 5.5 \ \Gamma \Gamma \mu$, где $\gamma = 2.8 \ \Gamma \Gamma \mu \cdot \kappa \Im^{-1}$ – гиромагнитное отношение в ЖИГ. На рис. 2*a*-2*в* показаны результаты измерения величины интенсивности МБС сигнала I_{НРС} при возбуждении структуры в области микроволновода S1. Из анализа рис. 2*а* видно, что интенсивность СВ становится модулированной вдоль направления оси у и мощность СВ перераспределяется между S1 и S2 таким образом, что наблюдается передача мощности из S1 в S2 на расстоянии, равном длине связи $L_0 = \pi/|k_1 - k_2|$, где $k_{1,2}$ – волновые числа симметричной и антисимметричной моды, соответственно [18]. При приложении напряжения $V_1 = 150 \text{ B}$ к электроду, расположенному над микроволноводом S1. в области пьезослоя, находящегося в непосредственном контакте с магнонным микроволноводом S1, создается электрическое поле напряженностью $E_1 = 7.5 \text{ кB/см}$. При этом величина длины связи увеличивается (см. рис. 26). При смене полярности напряжения на противоположную наблюдается уменьшение величины длины связи, как показано на рис. 26. Наблюдаемый эффект объясняется изменением величины внутреннего поля за счет обратного магнитострикционного эффекта в области микроволновода S1. При этом при положительной полярности электрического поля величина эффективного магнитного поля уменьшается, а при отрицательной — увеличивается [18]. При рассмотрении периодической структуры наблюдаемый эффект изменения величины L₀ сохраняется, однако в частотной зависимости величины интегральной интенсивности МБС сигнала полученной путем суммирования сигнала в области при y = 2.5 мм наблюдается появление двух провалов на часто-тах $f_{g1} = 5.6045$ ГГц и $f_{g2} = 5.607$ ГГц, показанных на рис. 3 красной сплошной линией, в отличие от отностительно однородного спектра для референсной структуры, отмеченного штрих-пунктирной линией на рис. 3. При приложении положи-



Рис. 3. Частотная зависимость величины интегральной интенсивности МБС сигнала, полученная путем суммирования сигнала в области при y = 2.5 мм для референсной структуры (штрих-пунктирная линия) и магнонно-кристаллической структуры при E = 0, 7.5 и -7.5 кВ/см.

тельного напряжения к электроду, расположенному над S1, наблюдается сдвиг обоих провалов в низкочастотную область, в то время как отрицательное напряжение приводит к перемещению частотных провалов в высокочастотную область в спектре ПМСВ. Наблюдаемое поведение провалов в спектре пропускания связанных периодических магнонных структур объясняется влиянием упругих деформаций как на величину внутреннего поля в одном из микроволноводов, так и на величину связи CB, распространяющихся в латеральной структуре.

Для описания физических процессов, определяющих физические характеристики при управлении спин-волновыми сигналами путем создания локальных упругих деформаций, удобным оказывается метод, представленный в [18], согласно которому выполняется расчет упругих деформаций, вызываемых внешним электрическим полем в слое пьезоэлектрика. Далее, рассчитывается профиль внутреннего магнитного поля в латеральных магнитных микроволноводах. Затем, полученные профили внутреннего магнитного поля используются в моделировании и расчете спектров собственных мод поперечно-ограниченных магнитных микроволноводов с помощью решения уравнения Ландау-Лифшица. Развитие настоящей работы направлено на создание магнонных структур на основе пленок ЖИГ нанометровых толщин, поскольку было показано, что в пленках толщиной 20 мкм константа затухания спиновых возбуждений может быть сравнима с константой затухания в объемных монокристаллах [20, 21]. Как известно, монокристаллы ЖИГ отличаются рекордно низкой величиной константы затухания. Успешный синтез диэлектрических и проводящих пленок нанометровых толщин с ультранизкой константой затухания позволяет активизировать исследования и разработки наноструктур на их основе со сверхдальним распространением магнонных состояний [22, 23].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подход, основанный на методах магнонной стрейнтроники может быть использован для создания магнонных логических устройств с управлением амплитудой и фазой спиновых волн. Управляемый электрическим напряжением спин-волновой транспорт может быть реализован в структурированных бислоях феррит-пьезоэлектрик. Для демонстрации данного физического эффекта в изготовленных бислоях методом мандельштамбриллюэновской спектроскопии был исследован управляемый напряжением спин-волновой транспорт вдоль латеральной структуры, состоящей из двух магнонно-кристаллических микроволноводов. Показана эффективная перестройка спинволновых характеристик с помощью приложения электрического поля к слою пьезоэлектрика. Механизм трансфоормации спектров спин-волновых сигналов заключается в управляемой упругими деформациями величине градиента внутреннего магнитного поля в области вблизи зазора между латеральными структурами.

Экспериментальное исследование методов управления спин-волновым сигналом в трехмерной магнонно-кристаллической структуре с пьезоэлектрическим слоем выполнено при поддержке РНФ (проект № 20-79-10191). Изготовление референсной структуры выполнено в рамках гранта Президента РФ (проект MK-1870.2020.9).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Никитов С.А., Сафин А.Р., Калябин Д.В. и др. // УФН. 2020. Т. 190. С. 1009.
- 2. Никитов С.А., Калябин Д.В., Лисенков И.В. и др. // УФН. 2015. Т. 185. № 10. С. 1099.
- Kruglyak V.V, Demokritov S.O., Grundler D. // J. Phys. D. 2010. V. 43. Art. No. 264001.
- 4. Serga A.A, Chumak A.V., Hillebrands B. // J. Phys. D. 2010. V. 43. Art. No. 264002.
- 5. *Khitun A., Bao M., Wang K.L.* // J. Phys D. 2010. V. 43. Art. No. 264005.
- Awschalom David D., Flatte Michael E. // Nat. Phys. 2007. V. 3. P. 153.
- Chappert C., Fert A., Frédéric Nguyen Van Dau // Nat. Mater. 2007. V. 6. P. 813.
- 8. *Bader S.D., Parkin S.S.P.* // Annu. Rev. Cond. Matt. Phys. 2010. V. 1. P. 71.
- 9. Бухараев А.А., Звездин А.К., Пятаков А.П., Фетисов Ю.К. // УФН. 2018. Т. 188. С. 1288.
- Sander D., Valenzuela S.O., Makarov D. // J. Phys. D. 2017. V. 50 Art. No. 363001.
- Fetisov Y. K., Srinivasan G. // Appl. Phys. Lett. 2006. V. 88. Art. No. 143503.

- Fetisov Y.K., Srinivasan G. // Appl. Phys. Lett. 2008. V. 93. Art. No. 033508.
- 13. Ustinov A.B., Fetisov Y.K., Srinivasan G. // Tech. Phys. Lett. 2008. V. 34. P. 593.
- 14. Ustinov A.B., Fetisov Y.K., Lebedev S.V., Srinivasan G. // Tech. Phys. Lett. 2010. V. 36. P. 166.
- 15. Sadovnikov A.V., Beginin E.N., Sheshukova S.E. et al. // Phys. Rev. B. 2019. V. 99. Art. No. 054424.
- 16. Sadovnikov A.V., Grachev A.A., Beginin E.N. et al. // Phys. Rev. Appl. 2017. V. 7. Art. No. 014013.
- 17. Sadovnikov A.V., Grachev A.A., Beginin E.N. et al. // IEEE Trans. Magn. 2017. V. 53. P. 1.

- Sadovnikov A.V., Grachev A.A., Sheshukova S.E. et al. // Phys. Rev. Lett. 2018. V. 120. Art. No. 257203.
- 19. *Demokritov S.O.* Spin wave confinement: propagating waves. Pan Stanford, 2017.
- 20. *Shikoh E., Ando K., Saitoh E. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2013. V. 110. Art. No. 127201.
- 21. Onbasli M.C., Kehlberger A., Kim D.H. et al. // APL Mater. 2014. V. 2. Art. No. 106102.
- 22. Barabanenkov Y., Osokin S., Kalyabin D., Nikitov S. // Phys. Rev. B. 2016. V. 94. Art. No. 184409.
- 23. *Тихонов В.В., Никитов С.А.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2017. Т. 81. № 8. С. 1073; *Tikhonov V.V., Nikitov S.A.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2017. V. 81. No. 8. P. 969.

Energy-efficient devices for processing information signals based on the principles of magnon straintronics: a study by the Mandelstam-Brillouin spectroscopy

A. V. Sadovnikov^{*a*, *b*, *, S. A. Nikitov^{*a*, *b*}}

^aKotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences, Saratov branch, Saratov, 410012 Russia

^bKotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 125009 Russia *e-mail: SadovnikovAV@gmail.com

Using the methods of Mandelstam–Brillouin spectroscopy of magnetic materials with spatial and frequency resolution, the possibility of controlling the spin-waveguide modes of signal propagation in lateral arrays of ferromagnetic strips with a piezoelectric layer is shown. The possibility of controlling the dipole spin-wave coupling in a lateral array of ferromagnetic stripes by creating local deformations in the region of localization of spin-wave excitations is demonstrated. It is shown that changing the absolute value and sign of the electric field makes it possible to effectively control the properties of propagating spin waves and the spatial distribution of the intensity of dynamic magnetization in the lateral structure at frequencies that are in the spectrum of surface and bulk magnetostatic waves. From an applied point of view, the results obtained can be used to create energy-efficient devices for processing information signals, such as demultiplexers with frequency-space selectivity.