УДК 537.624:537.632

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЕРВОЙ МОДЫ ОБРАТНЫХ ОБЪЕМНЫХ СПИНОВЫХ ВОЛН СО СЛАБОКОНТРАСТНЫМ МАГНОННЫМ КРИСТАЛЛОМ

© 2022 г. С. В. Герус<sup>1, \*</sup>, А. Ю. Анненков<sup>1</sup>, Э. Г. Локк<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки "Институт радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова Российской Академии Наук", Фрязинский филиал, Фрязино, Россия \*E-mail: svg318@ire216.msk.su

Поступила в редакцию 18.04.2022 г. После доработки 13.05.2022 г. Принята к публикации 23.05.2022 г.

Исследована брэгговская дифракция слаборасходящегося луча первой моды обратной объемной спиновой волны на слабоконтрастном магнонном кристалле. Обнаружены эффекты уширения и расслоения лучей нулевого и первого порядков дифракции на нитевидные лучи, а также непрохождение через магнонный кристалл лучей нулевого и первого порядка дифракции в некоторой полосе частот.

DOI: 10.31857/S0367676522090071

В последнее время большое внимание привлекает к себе проблема создания искусственных сред, которые, обладая некоторыми известными, исходными свойствами, в результате усложнения приобретают новые, дополнительные качества. Как известно в намагниченных ферритовых пленках могут распространяться волны прецессии намагниченности – спиновые волны (СВ) [1]. Если создать в ферритовой пленке регулярную структуру, период которой соизмерим с длиной наблюдаемой СВ, то образуется новая среда магнонный кристалл (МК), в котором по отношению к СВ проявляются как пространственно-периодические свойства кристалла, так и специфические свойства ферритовой пленки, такие, как анизотропия, наводимая полем подмагничивания, нелинейная дисперсия, незамкнутость изочастотных кривых и невзаимность распространения СВ.

Ранее были опубликованы работы по созданию МК на системе периодических канавок в ферритовой пленке [2], на металлических [3] решетках, ультразвуковых волнах [4] и т.д. Проводились также теоретические и экспериментальные исследования по распространению поверхностных СВ через контрастные [5, 6] и слабоконтрастные магнонные кристаллы [7–10]. В данной работе впервые изложены результаты экспериментального исследования, посвященного взаимодействию слабоконтрастного МК с обратными объемными спиновыми волнами (ООСВ).

Следует отметить, что распределение магнитного потенциала ООСВ по толщине ферритовой пластины является несимметричным<sup>1</sup>, т.е., наибольший максимум потенциала (которому соответствует основная часть энергии волны) всегда локализован либо на одной из поверхностей пластины, либо вблизи нее [11, 12]. При этом двум ООСВ с волновыми векторами, ориентированными под углами + ф и – ф по отношению к вектору внешнего магнитного поля  $\overline{H_0}$ , соответствуют распределения магнитного потенциала, имеющие наибольший максимум у разных поверхностей пластины. Очевидно также, что невзаимные свойства ООСВ зависит от частоты, ориентации ф волнового вектора, номера моды и других параметров волны и феррита (подробнее см. [11, 12]).

В свою очередь, слабоконтрастный МК сформирован так, что амплитуда его собственного пространственно-периодического магнитного поля максимальна только на одной (внешней) поверхности ферритовой пленки (на которой находится магнитная сигналограмма, создающая это поле [7–10]). Поэтому при исследовании взаимодействия ООСВ с МК можно условно выделить два случая – когда стационарное поле МК и основная часть СВЧ поля ООСВ локализованы у

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Исключением является случай, когда ООСВ распространяется вдоль внешнего магнитного поля; в этом случае волна характеризуется симметричным распределением магнитного потенциала.

разных поверхностей ферритового слоя и когда эти поля локализованы у одной и той же поверхности. Ниже приводятся результаты экспериментального исследования взаимодействия первой моды ООСВ со слабоконтрастным МК для второго случая, при котором взаимодействие между МК и ООСВ максимально, а контрастность визуализации ООСВ в эксперименте достаточно высока.

Схема эксперимента в плоскости ферритовой пленки показана на рис. 1. В качестве ферритового образца использовалась пленка ЖИГ толщиной *s* = 38.7 мкм с намагниченностью насыщения  $4\pi M_0 = 1852$  Гс. Внешнее однородное поле имело величину  $H_0 = 463$  Э. Линейный преобразователь, имевший длину 5 мм, был расположен на поверхности пленки ЖИГ таким образом, чтобы волновые векторы возбуждающихся ООСВ были ориентированы под углом  $\phi = -25^{\circ}$  по отношению к вектору  $H_0$  (рис. 1). Как показали предварительные расчеты, выполненные на основе работ [13, 14], при выбранной ориентации преобразователя в пленке ЖИГ в широком интервале частот должны возбуждаться лучи первой моды ООСВ, характеризующиеся малой дифракционной расходимостью и вектором групповой скорости  $\overrightarrow{V_{gr}}$ , ориентированным примерно под углом  $\psi = -120^{\circ}$ к вектору  $\overline{H_0}$  (рис. 1). Как уже упоминалось, распределение ООСВ в сечении ферритовой пленки и величина угла  $\Psi$  должны зависеть от частоты волны.

На пути распространения слаборасходящегося луча ООСВ располагался участок одномерного слабоконтрастного МК. Пространственно-периодическое магнитное поле МК создавала тонкая высококоэрцитивная полоска магнитофонной ленты, на которой была записана синусоидальная магнитная сигналограмма. Располагаясь на поверхности пленки ЖИГ, магнитофонная лента с периодическим магнитным полем, слабым по сравнению с полем  $H_0$ , формировала в пленке слабоконтрастный МК с периодом 810 мкм, что соответствовало значению вектора решетки  $q = 77.6 \text{ см}^{-1}$ . На рис. 1 решетка МК условно изображена в виде ряда чередующихся полосок. При выполнении экспериментов вектор решетки МК

 $\vec{q}$  был ориентирован параллельно вектору  $\vec{H_0}$ , что обеспечило выполнение условий брэгговской дифракции для ООСВ на решетке кристалла в некотором диапазоне частот. В частности, к этим условиям относятся, во-первых, закон сохранения энергии (частоты), являющийся следствием стационарности пространственно-периодического поля МК во времени:

$$f\left(\overrightarrow{k_i}\right) = f\left(\overrightarrow{k_r}\right),\tag{1}$$

ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ том 86 № 9 2022

$$\vec{V}_{gr}$$

$$\vec{V}_{gr}$$

$$\vec{V}_{gr}$$

$$\vec{V}_{gr0}$$

$$\vec{V}_{gr1}$$

$$\vec{V}_{gr1}$$

**Рис. 1.** Схема эксперимента в плоскости ферритовой пленки: 1 - CBЧ-преобразователь, возбуждающий луч ООСВ, 2 - область расположения МК, 3 - подвижный приемный зонд. Показаны волновой вектор  $\vec{k}$  и вектор групповой скорости  $\overline{V_{gr}}$  исходной ООСВ, а также векторы групповой скорости  $\overline{V_{gr0}}$  и  $\overline{V_{gr1}}$  лучей нулевого и первого порядка дифракции.

где f и  $\vec{k_i}$  — частота и вектор волны, падающей на кристалл, а f и  $\vec{k_r}$  — частота и вектор волны, продифрагировавшей на кристалле. И, во-вторых, закон сохранения импульса

$$k_r = k_i + \vec{q}, \qquad (2)$$

являющийся аналогом условия Брэгга—Вульфа при рассеянии рентгеновских лучей на обычном кристалле.

Для уточнения типа дифракции, который будет наблюдаться при рассеянии ООСВ на МК, была предварительно оценена величина волнового параметра Q, введенного в [9] и аналогичного тому, который используется в акустооптике

$$Q = \frac{q^2 L}{k_i},\tag{3}$$

где L – ширина МК. Для возникновения брэгговской дифракции ООСВ на МК необходимо, чтобы при проведении эксперимента выполнялось условие  $Q \ge 1$ . При  $Q \ll 1$  рассеяние ООСВ на МК будет соответствовать случаю раманнатовской дифракции. Как показали расчеты, в описываемом ниже эксперименте реализуется случай, в котором  $q \sim k_i \sim 80$  см<sup>-1</sup>, L = 0.4 см и, следовательно, величина Q приблизительно равна  $32 \ge 1$ , – т.е.,



**Рис. 2.** Визуализированные распределения модуля (*a*, *в*) и реальной компоненты (*б*, *г*) комплексной амплитуды ООСВ в плоскости ферритовой пленки для частот 2800 МГц (*a*, *б*) и 2875 МГц (*в*, *г*): *1* – СВЧ-преобразователь, возбуждающий луч ООСВ, *2* – область ферритовой пленки, где находится МК.

выполняются условия для возникновения дифракции Брэгга.

Измерение распределения ООСВ вдоль поверхности ферритовой пленки осуществлялось методом подвижного зонда, представлявшего собой короткую приемную антенну (подробнее о методике измерений см. [15]). Для проведения измерений в области существования МК, весь образец вместе с сигналограммой был покрыт тонкой диэлектрической пленкой, что не позволяло подвижному зонду смещать магнитную сигналограмму в процессе измерений. Зонд измерял распределение комплексной амплитуды ООСВ в ферритовой пленке. Распределение модуля комплексной амплитуды ООСВ фактически дает представление о распределении и направлении распространения энергии ООСВ в плоскости ферритовой пленки и МК, а распределение реальной (или мнимой) компоненты – представление о форме волновых фронтов и о направлении фазовой скорости ООСВ.

Распределения модуля и реальной компоненты комплексной амплитуды ООСВ вдоль поверхности пленки ЖИГ, полученные в результате проведенных экспериментов, представлены на рис. 2. Линейный преобразователь, возбуждавший ООСВ, изображен на рис. 2 отрезком 1, а область пленки 2, где находится МК, ограничена прямоугольником. Как видно из рис. 2a, 26 при частоте 2800 МГц исходный луч ООСВ имеет несколько фронтов и после взаимодействия с МК часть луча проходит через него, образуя дифракционный максимум нулевого порядка, а другая часть отклоняется, образуя луч первого дифракционного максимума. С увеличением частоты и, следовательно, с уменьшением волнового числа

ориентация  $\psi$  вектора групповой скорости  $V_{gr}$  падающего луча относительно вектора  $\overline{H_0}$  меняется от  $\psi = -122^{\circ}$  при 2800 МГц до  $\psi = -116^{\circ}$  при 2900 МГц. В диапазоне частот 2850–2870 МГц оба продифрагировавших луча практически пропадают. С дальнейшим увеличением частоты при f =2875 МГц (рис. 2*в*, 2*г*) падающий луч становится практически однородным, а оба продифрагировавших луча опять появляются, но луч первого порядка оказывается шире, чем луч нулевого порядка. Отметим также, что оба дифракционных луча состоят из отдельных однородных продольных нитевидных лучей. С увеличением частоты эта тенденция сохраняется, причем нитевидных лучей становится больше и их контрастность падает.

Фурье анализ полученных картин не дает возможности исчерпывающе исследовать дисперсионные характеристики продифрагировавших лучей. Это связано, по-видимому, с сильным расслоением лучей нулевого и первого порядков дифракции, вследствие чего их фронты перестают быть плоскими и их уже сложно представить в виде разложения в интеграл Фурье по плоским волнам: неоднородность по ширине каждой нити луча становится большой и эффективное волновое число включает в себя именно эту неоднородность, а в продольном направлении луча при частотах выше 2860 МГц (рис. 2e, 2e) указанные нити фактически представляют собой деформированные волновые фронты.

Следует отметить также, что описываемые исследования проводились на сравнительно толстой пленке ЖИГ толщиной s = 38.7 мкм. Хотя в таких пленках ООСВ возбуждается лучше, чем в более тонких пленках, толстые пленки, как правило, состоят из множества ферритовых слоев с близкими, но разными магнитными параметрами [16]. Предварительные исследования показали, что использованная пленка ЖИГ тоже имела не меньше пяти таких слоев. Это обстоятельство значительно усложнило трактовку результатов Фурье анализа для лучей ООСВ нитевидной формы.

Таким образом, в данной работе исследовано взаимодействие первой моды ООСВ со слабоконтрастным МК для случая, когда стационарное поле МК и основная часть СВЧ поля ООСВ локализованы у одной и той же поверхности ферритовой пленки и, следовательно, взаимодействие между МК и ООСВ максимально, а контрастность визуализации ООСВ в эксперименте достаточно высока. В эксперименте наблюдалась брэгговская лифракция слаборасхоляшегося луча ООСВ на магнитном кристалле. В зависимости от частоты ООСВ обнаружено изменение направления и формы как падающего луча, так и лучей нулевого и первого порядка дифракции, в том числе уширение и расслоение на нити этих лучей. В полосе частот от 2850 до 2870 МГи наблюдалось одновременное непрохождение через МК лучей нулевого и первого порядка дифракции.

Работа выполнена за счет бюджетного финансирования в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Damon R.W., Eshbach J.R. // J. Phys. Chem. Solids. 1961. V. 19. No. 3/4. P. 308.
- 2. *Гуляев Ю.В., Никитов С.А., Плесский В.П.* // Радиотехн. и электрон. 1981. Т. 26. № 11. С. 2282.
- 3. Owens J.M., Smith C.V., Mears T.S. // IEEE MTT-S. Intern. Microwave Symp. Digest. 1979. P. 154.
- Гуляев Ю.В., Медведь А.В., Крышталь Р.Г., Сорокин В.Г. // Письма в ЖТФ. 1986. Т. 12. № 9. С. 502.
- Высоцкий С.Л., Кожевников А.В., Казаков Г.Т. и др. // Изв. вузов. Прикл. нелин. динам. 2007. Т. 15. № 3. С. 58.
- Банков С.Е., Никитов С.А. // Радиотехн. и электрон. 2008. Т. 53. № 5. С. 545; Bankov S.E., Nikitov S.A. // J. Commun. Techn. Electron. 2008. V. 53. No. 5. P. 515.

- Герус С.В., Харитонов В.Д. // ФММ. 1984. Т. 58. № 6. С. 1069.
- Вороненко А.В., Герус С.В. // Письма в ЖТФ. 1984. Т. 10. № 12. С. 746.
- 9. *Герус С.В.* Магнитостатические волны в пространственно-периодических и двумерно-неоднородных магнитных полях. Дис. ... докт. физ.-мат. наук. Фрязино: ИРЭ РАН, 2010. 317 с.
- Анненков А.Ю., Герус С.В. // Изв. РАН. Сер. физ. 2017. Т. 81. № 8. С. 1091; Annenkov A.Yu., Gerus S.V. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2017. V. 81. No. 8. Р. 984.
- Вашковский А.В., Локк Э.Г. // УФН. 2006. Т. 176. № 4. С. 403; Vashkovsky A.V., Lock E.H. // Phys. Usp. 2006. V. 49. No. 4. Р. 389.

- Локк Э.Г. // Радиотехн. и электрон. 2020. Т. 65. № 3. С. 267; Lock E.H. // J. Commun. Technol. Electron. 2020. V. 65. No. 3. P. 265.
- 13. Локк Э.Г. // УФН. 2012. Т. 182. № 12. С. 1327; Lock E.H. // Phys. Usp. 2012. V. 55. No. 12. P. 1239.
- Локк Э.Г. // Радиотехн. и электрон. 2015. Т. 60. № 1.
   С. 102; Lokk E.G. // J. Commun. Technol. Electron. 2015. V. 60. No. 1. Р. 33.
- Анненков А.Ю., Герус С.В. // Радиотехн. и электрон. 2012. Т. 57. № 5. С. 572; Annenkov A.Yu., Gerus S.V. // J. Commun. Techn. Electron. 2012. V. 57. No. 5. P. 519.
- 16. Герус С.В., Локк Э.Г. Анненков А.Ю. // Радиотехн. и электрон. 2021. Т. 66. № 12. С. 1216; Gerus S.V., Lock E.H., Annenkov А.Yu. // J. Commun. Technol. Electron. 2021. V. 66. No. 12. Р. 1378.

## Interaction of backward volume spin waves with a low contrast magnon crystal

## S. V. Gerus<sup>a, \*</sup>, A. Yu. Annenkov<sup>a</sup>, E. H. Lock<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences, Fryazino Branch, Fryazino, 141190 Russia \*e-mail: edwin@ms.ire.rssi.ru

The effect of Bragg diffraction of a weakly divergent beam of a backward bulk spin wave on a low contrast magnon crystal is discovered. Broadening and stratification of beams of zero and first orders of diffraction into filamentary beams was observed. In a certain frequency band, it was found that not only the zero-order beam, but also the first-order diffraction beam did not pass through the magnon crystal simultaneously.