

# Невзаимный параметрический спин-волновой резонанс в двухкомпонентных магнитных метаповерхностях

А.С. Бир, Д.В. Романенко, С.В. Гришин

СГУ им. Н.Г. Чернышевского

**Аннотация:** в работе приводятся экспериментальные результаты, демонстрирующие явление невзаимного параметрического спин-волнового резонанса в двухкомпонентных магнитных метаповерхностях. Данные метаповерхности состоят из непроводящей магнитной матрицы, выполненной на основе пленки железо-иттриевого граната (ЖИГ), на поверхности которой располагаются проводящие магнитные 1D и 2D периодические структуры в виде полосок/дисков пермаллоя [никель (20%)-железо (80%)], обладающего гораздо большей намагниченностью, чем ЖИГ. Периодические структуры изготовлены методом оптической литографии с применением взрывной технологии “lift-off”. Показано, что в спектре поверхностной магнитостатической спиновой волны (ПМСВ), распространяющейся в пленке ЖИГ, формируются полосы непропускания, которые не подчиняются условию Брэгга и не связаны с отражением ПМСВ от периодической структуры. Указанные полосы непропускания обусловлены резонансными свойствами полосок/дисков пермаллоя. С использованием бриллюэновской спектроскопии установлено отсутствие параметрического распада, когда сигнал ПМСВ находится вне полосы непропускания, и наличие такого распада, когда сигнал ПМСВ находится в полосе непропускания. Также установлено, что изменение направления внешнего постоянного магнитного поля на противоположное приводит к изменению места положения полос непропускания в спектре ПМСВ, что обуславливает изменение частот, на которых наблюдается трехволновый параметрический распад ПМСВ.

**Ключевые слова:** метаповерхность, спиновые волны, параметрический резонанс, невзаимность

## 1. Введение

В последние годы активно проводятся исследования распространения и взаимодействия спиновых волн (СВ) в бикомпонентных магнитных метаповерхностях (БКММ) [1-3], которые представляют собой одну из разновидностей магнитных метаматериалов [4, 5]. Указанные метаповерхности состоят из двух магнетиков, один из которых, как правило, выступает в роли матрицы, а из другого формируется периодическая одномерная (1D) или двумерная (2D) структура на поверхности данной матрицы. Так, в [1] было показано, что в длинноволновой области спектра поверхностной магнитостатической спиновой волны (ПМСВ), бегущей в непроводящей магнитной матрице, выполненной на основе пленки железо-иттриевого граната (ЖИГ), на поверхности которой расположена 1D или 2D периодическая структура из металлического магнетика (пермаллоя), образуются полосы непропускания. Присутствие данных полос не связано с отражением ПМСВ от периодической структуры. В работах [2, 3] было установлено, что формирование указанных полос непропускания обусловлено резонансными свойствами самих магнитных включений, которые имели форму либо полосок [2], либо дисков [3]. Таким образом, БКММ с периодом структуры гораздо меньшим длины бегущей в ней СВ являются поглощающими БКММ. Однако, проведенные в [1-3] исследования были выполнены при подаче на вход БКММ микроволнового сигнала малого уровня мощности, т.е. в линейном режиме.

Хорошо известно, что в пленках ЖИГ существует большое многообразие

нелинейных явлений, среди которых особое место занимает нелинейный трехволновый параметрический распад длинноволновых МСВ на коротковолновые СВ. Данный эффект лежит в основе работы нелинейных устройств на МСВ: усилителей отношения сигнал/шум (шумоподавителей) [6] и ограничителей мощности [7]. Трехволновые параметрические процессы распада МСВ имеют частотные ограничения, которые зависят от направления и напряженности внешнего постоянного магнитного поля  $H_0$ , а также от граничных условий на поверхности магнитной пленки и ее намагниченности насыщения. Так, для ПМСВ, распространяющейся в свободной пленке ЖИГ с намагниченностью насыщения 1750 Гс, параметрический распад ПМСВ наблюдается на частотах до 4.9 ГГц, а для обратных объемных МСВ (ООМСВ), существующих в пленках пермаллоя с намагниченностью насыщения  $\sim 10$  кГс, на частотах до 18.7 ГГц при аналогичных напряженностях поля  $H_0$ . Таким образом, при одних и тех же значениях напряженности поля  $H_0$  трехволновый параметрический распад МСВ может существовать как в пленке ЖИГ, так и в пленке пермаллоя, на частотах до 4.9 ГГц. На частотах выше 4.9 ГГц трехволновый параметрический распад МСВ возможен только в пленке пермаллоя. Кроме того, ПМСВ являются невзаимными волнами, характеристики которых зависят от изменения направления поля  $H_0$  на противоположное [8].

В настоящей работе представлены экспериментальные результаты, демонстрирующие нелинейные явления в 1D и 2D БКММ, связанные с трехволновыми параметрическими процессами распада МСВ.

## 2. Макеты 1D и 2D бикомпонентных магнитных метаповерхностей

1D и 2D БКММ изготовлены из пленки ЖИГ, выращенной на подложке гадолиний-галлиевого граната методом жидкофазной эпитаксии. Пленка ЖИГ имеет толщину 10 мкм, намагниченность насыщения 1750 Гс и ширину линии ферромагнитного резонанса 0.48 Э. 1D периодические структуры в виде полосок пермаллоя [никель (20%)-железо (80%)] и 2D периодические структуры в виде пермалловых дисков толщиной 100 нм изготовлены на поверхности пленки ЖИГ методом оптической литографии с применением взрывной технологии “lift-off”. Период структур - 100-160 мкм, а ширина/диаметр пермалловых полосок/дисков – 40-50 мкм. Применение фотолитографического метода формирования структур включает такие технологические операции как изготовление маски из фоторезиста, магнетронное напыление металлов и процедуру “lift-off”. Формирование масок из фоторезиста на поверхности пленки ЖИГ проводилось при помощи лазерного генератора микроизображений mPG101 (Heidelberg Instruments) по виртуальным шаблонам. Далее на полученную маску наносилась плёнка пермаллоя методом магнетронного напыления. После нанесения пермаллоя на фоторезистивную маску проводилась процедура взрыва “lift-off”. Изображения полученных 1D и 2D периодических структур приведены на рисунке 1.

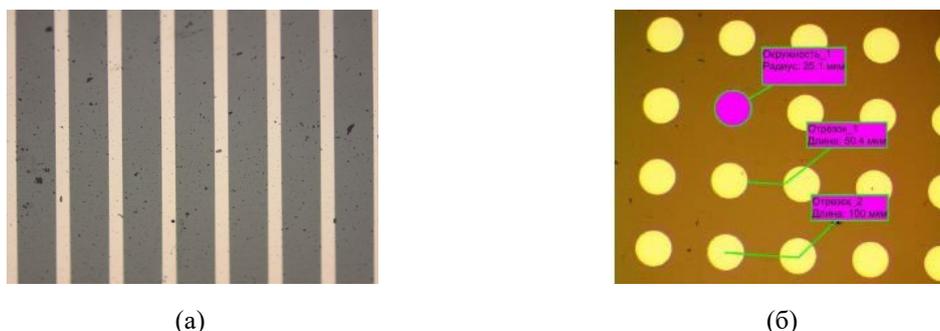
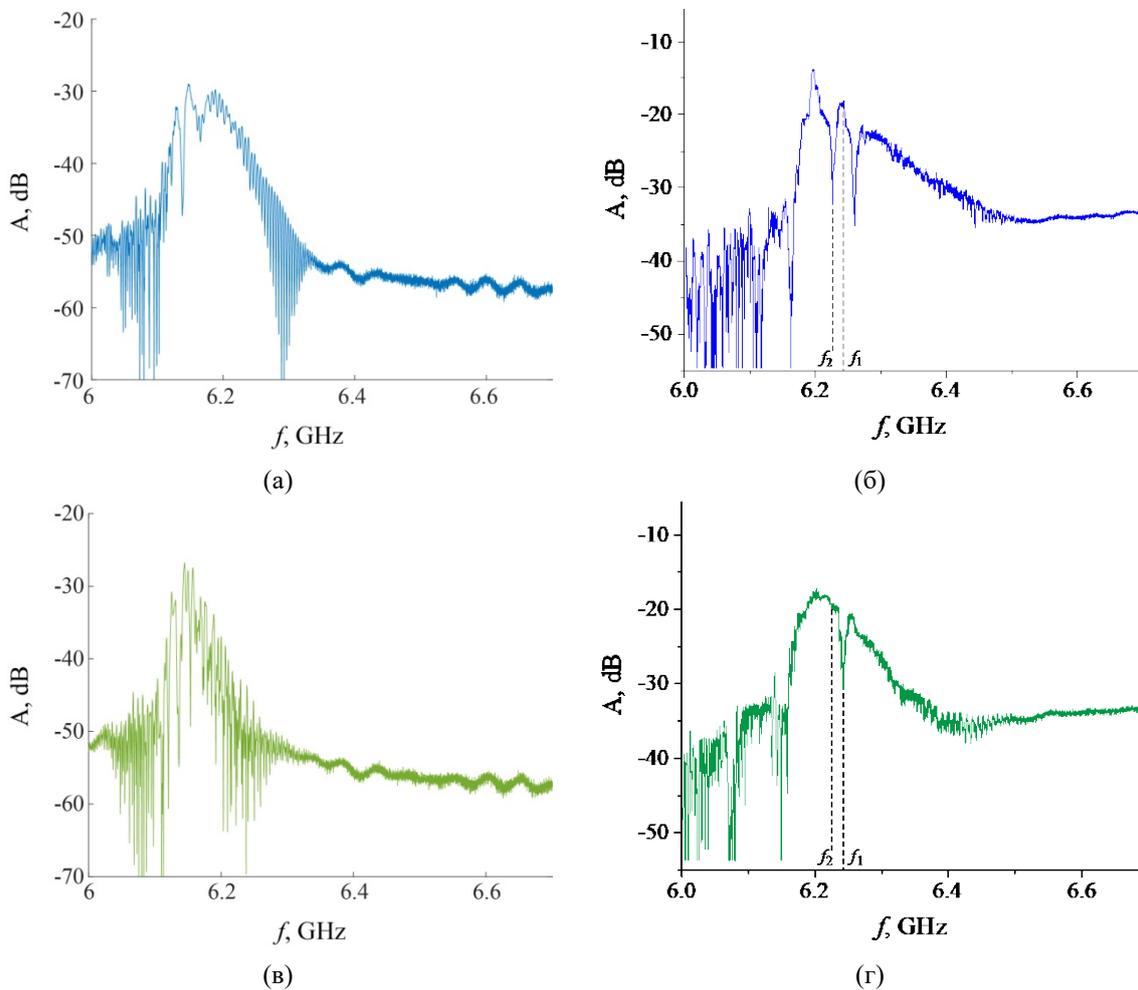


Рисунок 1. Фотографии 1D (а) и 2D (б) БКММ, полученные с оптического микроскопа.

Изготовленные макеты 1D и 2D БКММ размещались на поверхности

несимметричной микрополосковой линии (НМПЛ) для измерения амплитудно-частотных характеристик (АЧХ). НМПЛ представляет собой два (входной и выходной) разомкнутых микрополосковых проводника шириной 30 мкм, расположенных на диэлектрической подложке. Один конец каждого проводника закорочен на землю, а другой подсоединен к генератору или нагрузке. На рисунке 2 приведены АЧХ 1D и 2D БКММ. Из представленных результатов следует, что в обоих случаях в спектре ПМСВ наблюдаются полосы непропускания, а волновые числа ПМСВ, которые соответствуют этим полосам непропускания, не соответствуют брэгговским волновым числам. Таким образом, некоторые из наблюдаемых «провалов» на АЧХ 1D и 2D БКММ являются следствием резонансных свойств пермалловых включений, которые представляют собой 1D или 2D планарные микрорезонаторы. В таких магнитных микрорезонаторах формируются стоячие волны, находящиеся в спектре ООМСВ. Помимо этого, при изменении направления поля  $H_0$  на противоположное АЧХ обеих БКММ претерпевают существенные изменения. Полосы непропускания, присутствующие в спектре ПМСВ, теперь наблюдаются на других частотах, но волновые числа ПМСВ, которым соответствуют эти полосы непропускания, не меняются.

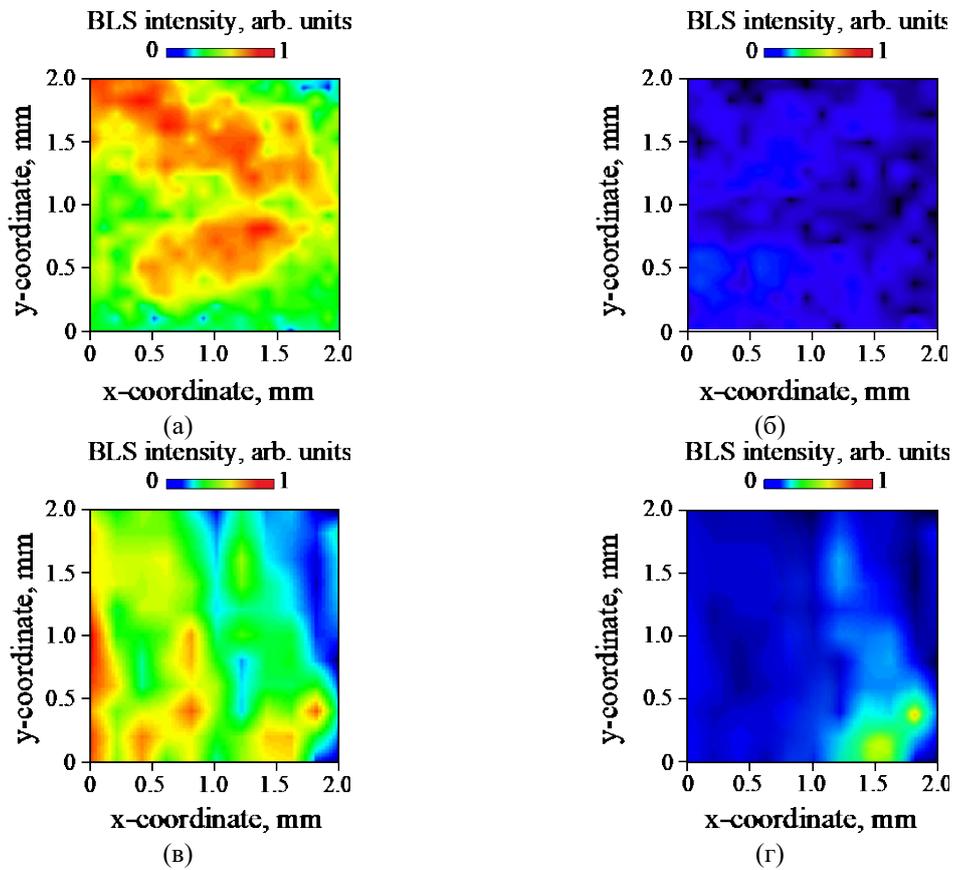


**Рисунок 2.** АЧХ 1D (а, в) и 2D (б, г) БКММ, измеренные в линейном режиме при  $H_0=1400$  Э (а, б) и  $H_0=-1400$  Э (в, г).

### 3. Невзаимный параметрический трехволновый резонанс

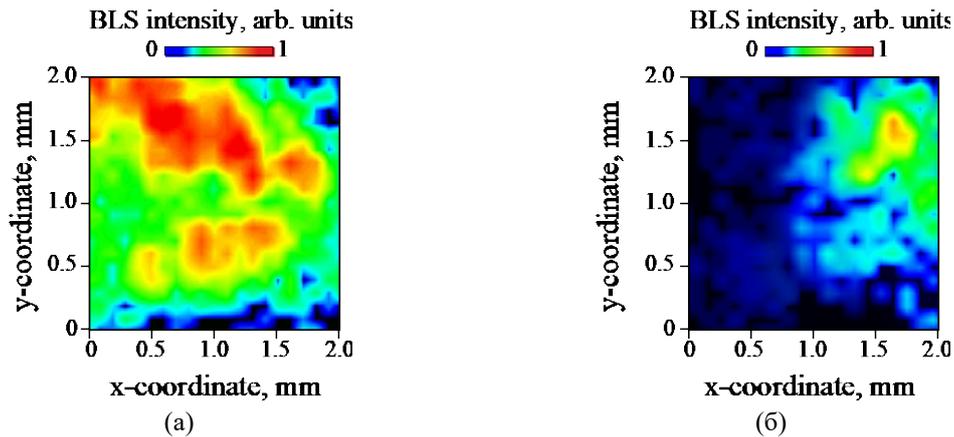
АЧХ, представленные на рисунке 2, измерены на частотах выше 6 ГГц, где трехволновый параметрический распад ПМСВ на коротковолновые СВ в пленке ЖИГ запрещен. Однако на этих частотах возможен трехволновый параметрический распад

стоячих ООМСВ, возбуждаемых в пермалловых 1D и 2D микрорезонаторах поверхностной МСВ, бегущей в пленке ЖИГ. На рисунке 3 приведены карты распределения квадрата амплитуды переменной намагниченности, полученные на установке бриллюэновской спектроскопии для 2D БКММ как на частотах ПМСВ  $f_1$  и  $f_2$ , так и на вдвое меньших частотах  $f_1/2$  и  $f_2/2$ , соответствующих частотам параметрически возбуждаемых СВ. Из представленных на рисунке 3а,б результатов следует, что когда частота сигнала  $f_1$  находится в спектре ПМСВ, но вне полосы не пропускания (см. рисунок 3а), то увеличение амплитуды переменной намагниченности на половинной частоте сигнала  $f_1/2$  с ростом мощности сигнала на частоте  $f_1$  не наблюдается (см. рисунок 3б). Если частота сигнала  $f_2$  находится в спектре ПМСВ, но теперь в полосе не пропускания (см. рисунок 3в), то в этом случае появляется отклик на половинной частоте  $f_2/2$  (см. рисунок 3г) с ростом мощности сигнала на частоте  $f_2$ , что свидетельствует о наличии на данных частотах трехволнового параметрического резонанса.



**Рисунок 3.** Карты распределения намагниченности ПМСВ (а, в) и параметрически возбуждаемых СВ (б, г), полученные для 2D БКММ при  $H_0=1400$  Э. На (а, б) результаты получены для  $f_1=6.243$  МГц и  $f_1/2$ . На (в, г) - для  $f_2=6.224$  МГц и  $f_2/2$ , соответственно. Мощность сигнала на частотах  $f_1$  и  $f_2$  равна +30 дБмВт.

Если изменить направление магнитного поля на противоположное, то это приведет к тому, что полоса не пропускания появится на частоте  $f_1$ , а на частоте  $f_1/2$  появится отклик (см. рисунок 4). Напротив, на частоте  $f_2$  полоса не пропускания теперь отсутствует и, как следствие этого, отсутствует отклик на частоте  $f_2/2$ . Необходимо отметить, что аналогичная ситуация наблюдается и в случае 1D БКММ. Таким образом, в исследуемых нами 1D и 2D БКММ мы наблюдаем явление невзаимного параметрического резонанса на частотах поглощения мощности ПМСВ, бегущей в пленке ЖИГ, магнитными микрорезонаторами.



**Рисунок 4.** Карты распределения намагниченности ПМСВ (а) и параметрически возбуждаемых СВ (б), полученные для 2D БКММ при  $H_0 = -1400$  Э. На (а) результаты получены для  $f_1 = 6.243$  МГц, а на (б) для  $f_1/2$ . Мощность сигнала на частоте  $f_1$  равна +30 дБмВт.

#### 4. Заключение

В заключение отметим, что полученные в работе экспериментальные результаты могут представлять интерес для разработки нелинейных устройств магоники.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 19-79-20121, <https://rscf.ru/project/19-79-20121/>

#### Список литературы

1. Высоцкий С.Л., Хивинцев Ю.В., Сахаров В.К., Новицкий Н.Н., Дудко Г.М., Стогний А.И., Филимонов Ю.А. Поверхностные магнитостатические волны в пленках железо-иттриевого граната с поверхностной субволновой метаструктурой из пленки пермаллоя// ФТТ. - 2020. - Т. 62. - № 9. - С. 1494-1498.
2. Qin H., Holländer R.B., Flajšman L., Hermann F., Dreyer R., Woltersdorf G., Dijken S. Nanoscale magnonic Fabry-Pérot resonator for low-loss spin-wave manipulation// Nat. Commun. – 2021. -V. 12. - P. 2293.
3. Yu H., Chen J., Cros V., Bortolotti P., Wang H., Guo C., Brandl F., Heimbach F., Han X., Anane A., Grundle D. Active ferromagnetic metasurface with topologically protected spin texture for spectral filters// Adv. Funct. Mater. – 2022. -V. 32. -P. 2203466.
4. Dewar G. Minimization of losses in a structure having a negative index of refraction// New J. Phys. - 2005. - Vol. 7. - P. 161.
5. Amelcheko M.D., Grishin S.V., Ogrin F.Yu., Nikitov S.A. Micromagnetic simulation of ferromagnetic metamaterials with wire inclusions// Phys. Rev. B. - 2023. - Vol. 108. - No 22. - P. 224401.
6. Adam J.D., Stitzer S.N. A magnetostatic wave signal-to-noise enhancer// J. Appl. Phys. Lett. - 1980. - V. 36. – No 6. - P. 485-487.
7. Adam J.D., Stitzer S.N. MSW frequency selective limiters at UHF// IEEE Trans. on Magn. - 2004. - V. 40. – No 4. - P. 2844-2846.
8. Mruczkiewicz M., Krawczyk M., Gubbiotti G., Tacchi S., Filimonov Yu.A., Kalyabin D.V., Lisenkov I.V., Nikitov S.A. Nonreciprocity of spin waves in metallized magnonic crystal// New J. Phys. – 2013. – V. 15. – P. 113023.