

Нелинейное устройство резонаторной магноники на основе супертонкой пленки железо-иттриевого граната

С.В. Гришин

Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского

Аннотация: в работе приводятся результаты экспериментального исследования прохождения одночастотного и двухчастотного монохроматических СВЧ-сигналов разного уровня мощности через микрополосковый полуволновый резонатор, в пучности ВЧ переменного тока которого располагается пленка железо-иттриевого граната (ЖИГ) 100 нм толщины. Установлено, что при изменении напряженности внешнего постоянного магнитного поля данная система ведет себя подобно системе двух связанных колебательных контуров, резонансная частота одного из которых (соответствует частоте ферромагнитного резонанса) перестраивается постоянным магнитным полем. Показано, что исследуемое устройство характеризуется тремя областями частот, в одной из которых оно работает как усилитель отношения сигнал/шум (или «шумоподавитель»), а в двух других – как ограничитель мощности. В двухчастотном режиме оценена частотная избирательность такого нелинейного устройства, которая сравнивается с аналогичной характеристикой, полученной при использовании пленки ЖИГ 40 мкм толщины.

Ключевые слова: резонаторная магноника, спиновые волны, супертонкие пленки ЖИГ

1. Введение

Резонаторная магноника является на сегодняшний день одним из бурно развивающихся направлений магноники, изучающим взаимодействие коллективных возбуждений спинов (магнонов) с ограниченными в пространстве электромагнитными полями, квантами которых выступают фотоны [1]. Объектами исследования резонаторной магноники являются резонаторные системы, содержащие магнитоупорядоченные среды, которые работают в режиме, так называемой, «сильной связи». В этом режиме величина связи между двумя подсистемами (фотонной и магнонной) является больше среднего уровня потерь энергии в обеих подсистемах. В режиме сильной связи происходит многократный обмен информацией между двумя подсистемами, что делает возможной когерентную обработку информации на основе магнонов [2].

Для реализации сильной фотон-магнонной связи, как правило, используются объемные образцы диэлектрических ферритов в виде сфер железо-иттриевого граната (ЖИГ), которые обладают низким значением постоянной затухания Гильберта $\alpha=10^{-5}$ - 10^{-3} и высокой плотностью спинов $4.0 \times 10^{27} \text{ м}^{-3}$. В тоже самое время, сильная фотон-магнонная связь наблюдается и при использовании ферромагнитного металла (пермаллоя) [3], который применяется для создания наноразмерных устройств спинтроники, а также антиферромагнетиков [4], предназначенных для работы в терагерцовом диапазоне частот. В качестве резонаторов используются различные конструкции в виде 2D [5] и 3D [6] резонаторов.

Для реализации сильной фотон-магнонной связи вместо объемных образцов ЖИГ-сфер используют также тонкие пленки ЖИГ [7-11]. В отличие от ЖИГ-сфер, в которых только мода ферромагнитного резонанса (ФМР) участвует в фотон-магнонном взаимодействии, в пленках ЖИГ существуют различные типы магнитостатических спиновых волн (МСВ), которые могут взаимодействовать с фото-

нами. Тип этих волн зависит от ориентации внешнего постоянного магнитного поля относительно поверхности пленочного образца и направления распространения волнового вектора. При определенных поперечных размерах пленки ЖИГ из бегущих МСВ могут образовываться моды стоячих волн, на которых был открыт эффект суперсильной фотон-магнонной связи [7]. В работах [10, 11] было исследовано взаимодействие обратных объемных МСВ (ООМСВ), возбуждающихся только вблизи частоты ФМР, с низшей модой микрополоскового полуволнового резонатора, и показано, что при перестройке напряженности внешнего постоянного магнитного поля данная планарная система ведет себя подобно системе двух связанных колебательных контуров. Кроме того, было установлено, что в нелинейном режиме указанная система с магнон-фотонным взаимодействием работает как усилитель отношения сигнал/шум. Необходимо отметить, что в экспериментальных работах [7-11] использовались пленки ЖИГ микронной толщины.

На сегодняшний день в магненике активно проводятся исследования распространения и взаимодействия спиновых волн в супертонких пленках ЖИГ, имеющих толщину от десятков до сотен нанометров [12]. Создание таких пленок обусловлено стремлением миниатюризации устройств магненики и их переходом в нанометровый масштаб. В настоящей работе, являющейся продолжением ранее выполненных работ [10, 11], приводятся результаты экспериментального исследования линейного и нелинейного режимов работы связанной системы «микрополосковый резонатор – пленка ЖИГ», в которой пленка ЖИГ имеет субмикронную толщину.

2. Микрополосковый резонатор, нагруженный супертонкой пленкой ЖИГ

На рисунке 1а приведено схематическое изображение микрополоскового полуволнового резонатора, в центральной части которого располагается супертонкая пленка ЖИГ толщиной $d=100$ нм, шириной (определяет степень перекрытия пленкой микрополоскового резонатора) 3 мм и длиной 1 см. Пленка ЖИГ, выращенная методом жидкофазной эпитаксии на подложке гадолиний галлиевого граната, имеет эффективную намагниченность вблизи поверхности $4\pi M_{eff} \cong 1970$ Гс и ширину линии ферромагнитного резонанса $2\Delta H \cong 1.1$ Э на частотах ~ 3 ГГц. Микрополосковый полуволновый резонатор является планарным резонатором проходного типа. Он выполнен на основе несимметричной микрополосковой линии передачи, которая состоит из металлизированной с одной стороны диэлектрической подложки толщиной 500 мкм, на другой стороне которой находится разомкнутый с обеих сторон полосковый проводник (резонатор) шириной $w=500$ мкм и длиной 18.1 мм. Для связи с генератором и нагрузкой на расстоянии 600 мкм от резонатора располагаются два полосковых проводника шириной 500 мкм, степень перекрытия которых с резонатором составляет величину 5 мм. Основной вид колебания микрополоскового полуволнового резонатора характеризуется резонансной частотой $f_0=3079$ МГц и нагруженной добротностью $Q_H=106$. Внешнее постоянное магнитное поле $H_0 = 530$ Э приложено в плоскости исследуемой планарной системы и направлено перпендикулярно микрополосковому резонатору. Фактически, пленка ЖИГ располагается в пучности ВЧ тока

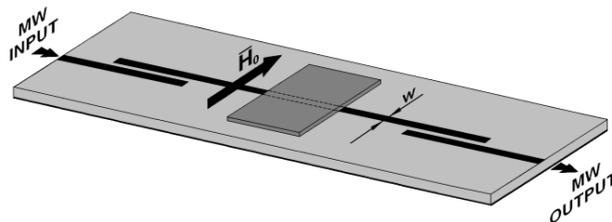


Рисунок 1. Схематическое изображение системы «микрополосковый резонатор – супертонкая пленка ЖИГ».

основной (нижней) моды резонатора, что, как будет показано далее, приводит к эффективному возбуждению колебаний намагниченности на частоте ФМР $f_{\perp} = \sqrt{f_H(f_H + f_M)}$ (где $f_H = \gamma H_0$, γ - гиромагнитное отношение, $f_M = 4\pi\gamma M_{eff}$).

На рисунке 2а приведены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) планарной системы «микрополосковый резонатор – супертонкая пленка ЖИГ», измеренные при трех уровнях мощности входного СВЧ-сигнала. Видно, что в линейном режиме данная система ведет себя подобно системе двух связанных колебательных контуров. С увеличением входной мощности один из колебательных контуров (супертонкая пленка ЖИГ в режиме ФМР) становится нелинейным. Это приводит к уменьшению уровня подавления большого сигнала на частотах, находящихся между двумя резонансными частотами системы, и к увеличению уровня его подавления на резонансных частотах связанной системы (см. рисунок 2б). В одной из частотных областей устройство работает как «усилитель отношения сигнал/шум», а в двух других - как ограничитель мощности.

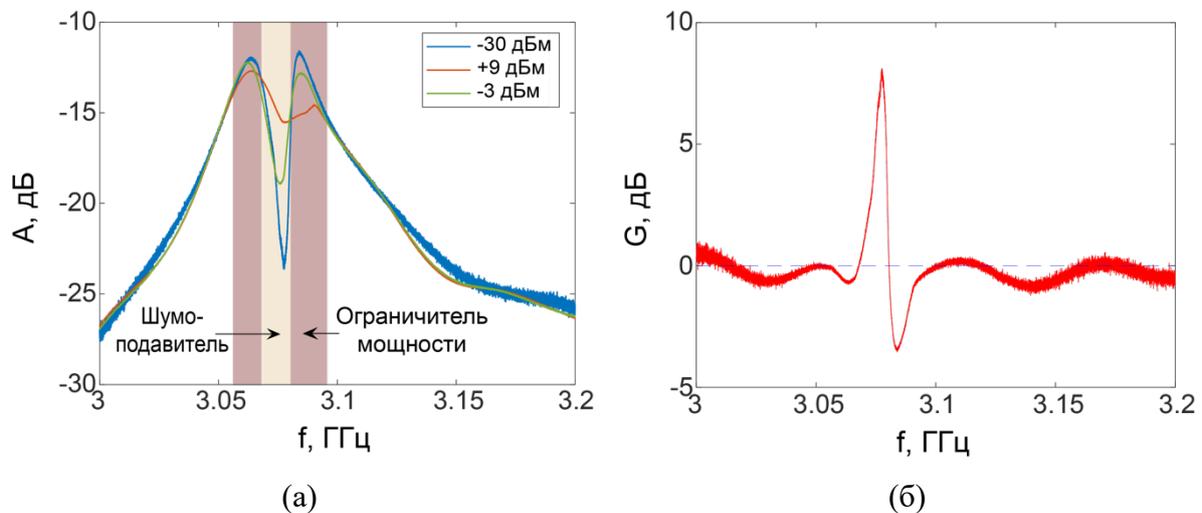


Рисунок 2. АЧХ системы «микрополосковый резонатор – супертонкая пленка ЖИГ» (а) и частотная зависимость отношения большой сигнал/малый сигнал $G=A_{\delta}-A_m$ (б), полученные для поля $H_0=530$ Э. На (а) АЧХ получены для трех уровней мощности входного СВЧ-сигнала. На (б) зависимость $G(f)$ получена для мощности большого сигнала +9 дБм и мощности малого сигнала -30 дБм.

3. Прохождение двухчастотного сигнала через систему «микрополосковый резонатор - супертонкая пленка ЖИГ»

В работе также были проведены исследования одновременного прохождения двух монохроматических СВЧ-сигналов разного уровня мощности (большого и малого СВЧ-сигналов) через систему «микрополосковый резонатор – супертонкая пленка ЖИГ». Результаты данного исследования приведены на рисунке 3. Из представленных результатов следует, что при мощности большого СВЧ-сигнала +9 дБм его влияние на амплитуду малого СВЧ-сигнала начинается с величины частотной отстройки порядка ± 20 МГц, где отношение большой сигнал/малый сигнал имеет максимальное значение $G \approx 8$ дБ. При превышении данной величины отстройки большой СВЧ-сигнал практически не оказывает заметного влияния на амплитуду малого СВЧ-сигнала. При значениях меньших данной величины отстройки между сигналами амплитуда малого сигнала начинает возрастать и вблизи частоты большого сигнала отношение большой сигнал/малый сигнал становится равным нулю. В работе [11] были выполнены аналогичные измерения, но для пленки ЖИГ толщиной 40 мкм. Из сравнения результатов следует, что в [11] гораздо меньшее значение частотной отстройки (± 13 МГц) достигалось при гораздо большей мощности большого СВЧ-сигнала (+21 дБм).

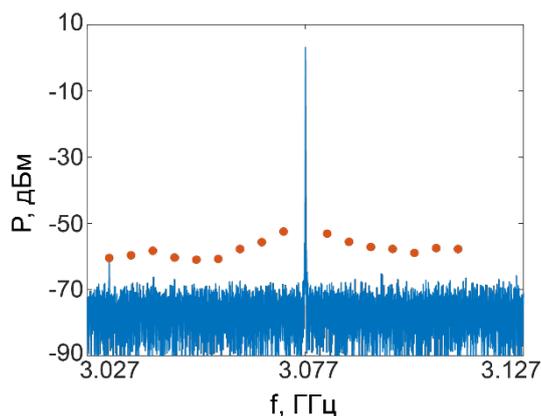


Рисунок 3. Спектр мощности двухчастотного СВЧ-сигнала, прошедшего через систему «микрополосковый резонатор – супертонкая пленка ЖИГ» при $H_0=530$ Э. Кружками показаны максимальные значения амплитуды малого сигнала при его перестройке вблизи частоты большого сигнала. Мощность большого сигнала +9 дБм, мощность малого сигнала -30 дБм.

4. Заключение

В заключение отметим, что полученные в работе результаты могут представлять интерес при разработке нелинейных устройств резонаторной магноники.

Исследование выполнено за счет гранта **Российского научного фонда № 23-79-30027**, <https://rscf.ru/project/23-79-30027/>

Список литературы

1. Barman A. and et al. The 2021 magnonics roadmap// J. Phys. Condens. Matter. – 2021. – Vol. 33. – P. 413001.
2. Harder M., Yao B.M., Gui Y.S., Hu C.-M. Coherent and dissipative cavity magnonics// J. Appl. Phys. - 2021. - V. 129. – No 20. - P. 201101.
3. Hou J.T., Liu L. Strong coupling between microwave photons and nanomagnet magnons // Phys. Rev. Lett. - 2019. - Vol. 123. - No 10. - P. 107702.
4. Yuan H.Y., Wang X.R. Magnon-photon coupling in antiferromagnets// Appl. Phys. Lett. - 2017. - Vol. 110. - No 8. - P. 082403.
5. Huebl H., Zollitsch C.W., Lotze J., Hocke F., Greifenstein M., Marx A. High cooperativity in coupled microwave resonator ferrimagnetic insulator hybrids// Phys. Rev. Lett. - 2013. - Vol. 111. - No 12. - P. 127003.
6. Tabuchi Y., Ishino S., Ishikawa T., Yamazaki R., Usami K., Nakamura Y. Hybridizing ferromagnetic magnons and microwave photons in the quantum limit// Phys. Rev. Lett. - 2014. - Vol. 113. - No 8. - P. 083603.
7. Zhang X., Z. Changling, J. Liang, Tang H.X. Superstrong coupling of thin film magnetostatic waves with microwave cavity// J. Appl. Phys. - 2016. - V. 119. – No 2. - P. 023905.
8. Bhoi B., Kim B., Kim J., Cho Y.-J., Kim S.-K. Robust magnon-photon coupling in a planar-geometry hybrid of inverted split-ring resonator and YIG film// Sci Rep. – 2017.- Vol. 7. – P. 11930.
9. Kim J., Kim B., Kim B., Jeon H., Kim S.-K. Magnetic-field controlled on-off switchable non-reciprocal negative refractive index in non-Hermitian photon-magnon hybrid systems// Nat. Commun. – 2024. – Vol. 15. – P. 9014.
10. Гришин С.В., Гришин В.С., Гурзо В.В., Шараевский Ю.П. Взаимная связь микрополоскового резонатора с ферромагнитной плёнкой при возбуждении магнитостатических волн// Радиотехника и электроника. - 2003. - Т.48. - № 6. - С. 724-730.
11. Гришин С.В., Шараевский Ю.П. Нелинейное подавление сверхвысокочастотных сигналов в резонансной линии передачи на магнитостатических волнах// Письма в ЖТФ. - 2005. - Т. 31. - № 2. - С. 77-83.
12. Wang Q., Csaba G., Verba R., Chumak A.V., Pirro P. Nanoscale magnonic networks// Phys. Rev. Appl. – 2024. – Vol. 21. – No 4. P. 040503.