

Исследование бистабильного активного кольцевого резонатора на ферромагнитной пленке

Р.В. Гапончик, В.В. Витько, А.А. Никитин, А.Б. Устинов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Аннотация: Экспериментально исследованы характеристики активного кольцевого резонатора (АКР) на поверхностных спиновых волнах, распространяющихся в касательно намагниченной пленке железо-иттриевого граната. Показано, что увеличение коэффициента усиления выше порогового значения приводит к появлению бистабильной передаточной характеристики резонатора. Частотный диапазон бистабильности расширяется с ростом резонансной частоты АКР при увеличении внешнего магнитного поля.

Ключевые слова: бистабильность, активный кольцевой резонатор, нелинейные спиновые волны

1. Введение

Эффект бистабильности колебаний намагниченности исследуется довольно давно. Бистабильность наблюдается в различных магнитных [1-3], магнитоэлектрических [4, 5], фотонных [6, 7] и других резонансных системах. Недавно было показано, что явление бистабильности проявляется также в активных кольцевых резонаторах (АКР) на ферромагнитных плёнках. В работе [8] эксперименты проводились для прямых объёмных спиновых волн, которые распространяются в перпендикулярно намагниченных плёнках и демонстрируют сильную нелинейность относительно других типов спиновых волн. Отметим, что нелинейное поведение таких спиновых волн обеспечивает положительный нелинейный сдвиг частоты.

В настоящей работе экспериментально исследовано явление бистабильности передаточных характеристик АКР на поверхностных спиновых волнах (ПСВ), которое возникает благодаря отрицательному нелинейному сдвигу частоты, и изучено влияние параметров АКР на особенности бистабильных характеристик.

2. Эксперимент

Исследования проводились на экспериментальном макете АКР, состоящем из линии задержки на ПСВ, двух направленных ответвителей, СВЧ-усилителя и перестраиваемого аттенюатора (см. рисунок 1).

Спин-волновая линия задержки была изготовлена из волновода на пленке железо-иттриевого граната (ЖИГ) толщиной 5.54 мкм, эпитаксиально выращенной на подложке галлий-гадолиниевого граната (ГГГ) толщиной 500 мкм. Волновод из пленки ЖИГ имел длину 20 мм и ширину 1.6 мм. Намагниченность насыщения плёнки при комнатной температуре была 1750 Гс, а ширина линии ферромагнитного резонанса на частоте 5 ГГц составляла 0.5 Э. Две микрополосковые антенны шириной 50 мкм и длиной 2 мм располагались над плёнкой ЖИГ на расстоянии 3.5 мм друг от друга. Взаимная ориентация микрополосковых антенн и внешнего магнитного поля выбиралась таким образом, чтобы выполнялись условия для возбуждения, распространения и приема поверхностных спиновых волн. Для этого плёнка касательно намагничивалась до насыщения однородным магнитным полем, направленным параллельно антеннам. Конструкция экспериментального макета была реализована таким образом, чтобы обеспечить возможность изменения внешнего магнитного поля в диапазоне от 1000 до 3500 Э.

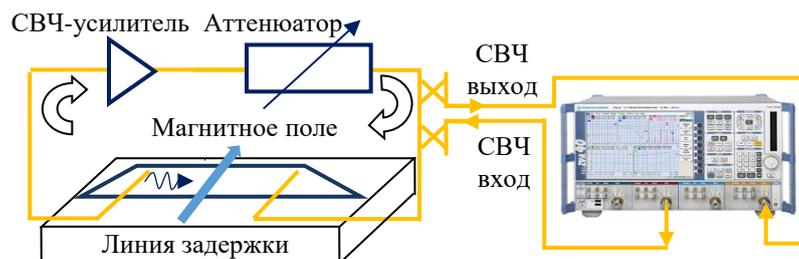


Рисунок 1. Экспериментальный макет.

Предварительные измерения показали, что все элементы активного кольцевого резонатора, кроме спин-волновой линии задержки, работают в линейном режиме в диапазоне частот от 1 до 12 ГГц. СВЧ-усилитель вместе с перестраиваемым аттенуатором использовались для управления коэффициентом усиления кольца. Передаточные характеристики АКР измерялись через два направленных ответвителя (с коэффициентом связи минус 10 дБ) с помощью векторного анализатора цепей R&S ZVA 40. Для наблюдения бистабильного поведения передаточных характеристик частота СВЧ-сигнала изменялась как вверх, так и вниз. Для обеспечения линейного режима работы при малых значениях коэффициента усиления, мощность сигнала на выходе анализатора цепей составляла минус 20 дБм.

3. Результаты

Кратко рассмотрим формирование передаточных характеристик АКР. СВЧ-сигнал подается в кольцо через направленный ответвитель и поступает на входную антенну линии задержки, где возбуждает ПСВ. При распространении в плёнке ЖИГ спиновая волна приобретает фазовый набег и затухает. Последовательное соединение СВЧ-усилителя и перестраиваемого аттенуатора используется для компенсации потерь, накопленных сигналом при распространении в элементах кольца (см. рисунок 1). Наконец, часть циркулирующего сигнала ответвляется из кольца выходным направленным ответвителем и подаётся на векторный анализатор цепей. Оставшаяся часть сигнала продолжает циркулировать по кольцу. Синфазная интерференция циркулирующих сигналов в кольце приводит к формированию резонансных мод. Для внешнего магнитного поля 1150 Э первая резонансная мода наблюдается на частоте 5.04 ГГц. Частотный диапазон между соседними модами изменяется от 7.9 МГц до 5 МГц, что соответствует закону дисперсии ПСВ в плёнке ЖИГ и изменению времени задержки в плёнке от 126 нс до 200 нс. Время задержки спиновой волны значительно превышает время задержки в других элементах кольца, поэтому резонансные волновые числа определяются в соответствии с выражением $\beta_m = 2\pi m/d$, где m – номер резонансной моды. Увеличение коэффициента усиления приводит к увеличению коэффициента передачи на резонансных частотах. Дальнейшее увеличение коэффициента усиления приводит к переходу АКР в нелинейный режим, а затем при полной компенсации потерь в режим автогенерации.

Сначала было проведено исследование влияния коэффициента усиления на передаточные характеристики АКР. На рисунке 2(а) представлена одна из резонансных частот, демонстрирующая наименьшие потери и наибольшую добротность. Изменение коэффициента усиления от минус 3дБ до минус 1дБ обеспечивает увеличение добротности АКР на этой частоте с 4000 до 25000 (см. черная и красная линии на рисунке 2(а)). Здесь и далее по тексту коэффициент усиления задается относительно величины, обеспечивающей полную компенсацию потерь и

переход АКР в режим автогенерации. Дальнейшее увеличение коэффициента усиления приводит к несимметричному искажению формы резонансного пика. Остановимся на этом процессе подробнее. При некотором значении коэффициента усиления амплитуда циркулирующей волны начинает превышать порог нелинейных явлений. В результате в плёнке ЖИГ появляется дополнительный нелинейный фазовый набег ПСВ, распространяющихся в устойчивом нелинейном режиме. Это явление можно трактовать как процесс рассеяния исходной волны на волнах с близкими волновыми числами и качественно объяснить следующим образом. Прецессия намагниченности описывается уравнением Ландау-Лифшица. Полный вектор намагниченности \mathbf{M} является суммой статической намагниченности \mathbf{M}_0 и переменной составляющей намагниченности \mathbf{m} , которые определяют амплитуду спиновой волны. Из уравнения Ландау-Лифшица следует, что длина вектора \mathbf{M} остается неизменной. Следовательно, увеличение амплитуды приводит к уменьшению статической намагниченности \mathbf{M}_0 [9]. Это выражается в сдвиге дисперсионной кривой ПСВ вниз и появлению положительного нелинейного фазового набега. В свою очередь, появление нелинейного фазового набега приводит к изменению условия резонанса ($\beta_m d + \varphi_{nl} = 2\pi m$), что проявляется в сдвиге резонансных мод в область низких частот. Явление бистабильности возникает, если нелинейный сдвиг частоты превышает $\sqrt{3}\Delta\omega/2$, где $\Delta\omega$ – ширина резонансной кривой [10]. В эксперименте эффект бистабильности проявляется при значении усиления минус 0.4 дБ. Передаточная характеристика, соответствующая порогу бистабильности показана на рисунке 2 (а) синим цветом. При дальнейшем увеличении коэффициента усиления происходит расширение области бистабильности, которая достигает 77 кГц при коэффициенте усиления минус 0.01 дБ (см. фиолетовая линия рисунок 2(а)). Стрелки на рисунке 2 показывают направления скачков бистабильной передаточной характеристики, наблюдаемые при изменении частоты сигнала вниз и вверх.

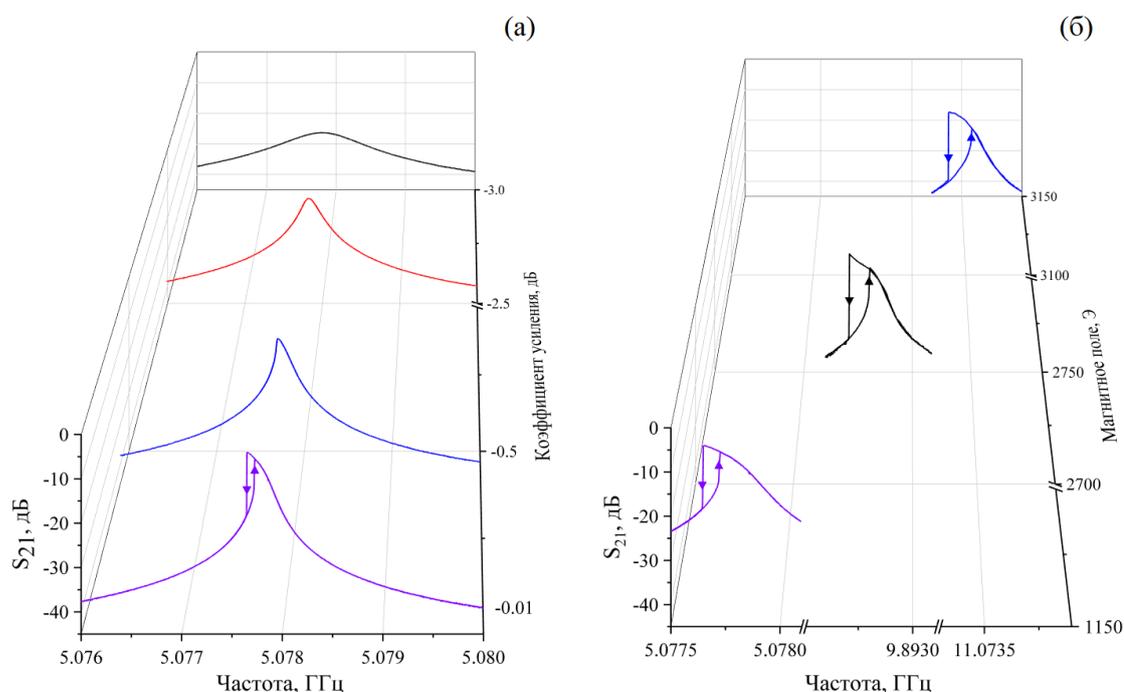


Рисунок 2. Передаточные характеристики АКР на резонансной частоте при различных значениях коэффициентах усиления (а) и внешнего магнитного поля (б).

Во второй части работы исследовано расширение частотного диапазона бистабильности путем увеличения напряженности внешнего магнитного поля. В основе этого исследования лежит зависимость нелинейного коэффициента от величины внешнего магнитного поля. Нелинейный сдвиг частоты описывается

$$\Delta\omega \cong N|u|^2, \quad \text{где} \quad N = \partial\omega(k, |u|^2) / \partial|u|^2 \cong (\omega_H + \omega_M/2)\omega_H / \omega - \omega$$

– кубический нелинейный коэффициент для ПСВ, $\omega(k, |u|^2)$ – нелинейный закон

дисперсии ПСВ, $|u|^2 = |m|^2 / (2M_0)$ – безразмерная амплитуда спиновых волн,

$\omega_H = \gamma\mu_0 H$ – частота ферромагнитного резонанса, $\omega_M = \gamma\mu_0 M$, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ Гн/м –

магнитная постоянная, $\gamma = 2.8$ МГц/Э – гиромагнитное отношение для спина

электрона. Как видно из приведенного выражения нелинейный коэффициент N возрастает с увеличением магнитного поля. Это приводит к увеличению нелинейного сдвига частоты и расширению частотного диапазона бистабильности. Передаточные характеристики резонансных мод, соответствующих наименьшим потерям в кольце, при магнитных полях 1150 Э, 2750 Э и 3150 Э показаны на рисунке 2 (б) фиолетовой, черной и синей линиями, соответственно. Видно, что увеличение внешнего магнитного поля приводит к расширению частотного диапазона бистабильности. Ширина диапазона достигает значения 112 кГц для поля 2750 Э и 185 кГц для поля 3150 Э. Такое поведение качественно согласуется с приведенными выше теоретическими соображениями.

4. Заключение

Экспериментально исследовано явление бистабильности АКР, содержащего линию задержки на ПСВ. Первоначально исследовалось влияние коэффициента усиления на передаточные характеристики АКР. Показано, что изменение коэффициента усиления с минус 3 дБ до минус 1 дБ обеспечивает увеличение добротности с 4000 до 25000. Дальнейшее увеличение коэффициента усиления приводит к затягиванию резонансной частоты и искажению формы передаточной характеристики. Бистабильность проявляется на передаточной характеристике АКР при коэффициенте усиления минус 0.4 дБ при поле 1150 Э. Продемонстрировано, что частотный диапазон бистабильности расширяется с увеличением коэффициента усиления. Переход в режим автогенерации ограничивает уширение этого частотного диапазона. Максимальная ширина частотного диапазона бистабильности составила 77 кГц для поля 1150 Э при усилении минус 0.01 дБ. Частотный диапазон существования бистабильности дополнительно расширялся с 77 кГц до 185 кГц при увеличении внешнего магнитного поля с 1150 Э до 3150 Э.

Исследование выполнено при финансовой поддержке **РФФИ и ЯОПН (проект № 21-52-50006)** и совета по грантам Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских учёных (Грант № МК1938.2020.8).

Список литературы

1. Fetisov Y. K. et. al. Nonlinear ferromagnetic resonance and foldover in yttrium iron garnet thin films- inadequacy of the classical model //IEEE transactions on magnetics. –1999. –V.35. –№ 6. –P. 4511-4521.
2. Melkov G. A. et. al. Nonlinear ferromagnetic resonance in nanostructures having discrete spectrum of spin-wave modes //IEEE Magnetism Letters. –2013. –№ 4, –P. 4000504-4000504.
3. Wang Q. et. al. A nonlinear magnonic nano-ring resonator. //Computational Material. –2020. –V. 6. –№ 1. –P. 1-7.
4. Ustinov A. B. et. al. Electric switching in bistable ferrite-piezoelectric microwave resonator //Technical Physics Letters. –2010. –V. 36. –№ 2. –P. 166-169.
5. Fetisov Y. K. et. al. Bistability in a multiferroic composite resonator //Applied Physics Letters. –2018. –V. 113. –№ 2. –P. 022903.
6. Vitko V. V. et. al. Microwave bistability in active ring resonators with dual spin-wave and optical nonlinearities //IEEE Magnetism Letters. –2018. –№ 9. –P. 1-4.
7. Nikitin A. A. et. al. Carrier-induced optical bistability in the silicon micro-ring resonators under continuous wave pumping //Optics Communications. –2021. –№ 480. –P. 126456.
8. Janantha P. P. et. al. Foldover of nonlinear eigenmodes in magnetic thin film based feedback rings //Physical Review B. –2017. –V. 95. –№ 6. –P. 064422.
9. Ustinov A. B., Kalinikos B. A. A microwave nonlinear phase shifter //Applied Physics Letters. –2008. –V. 93. –№ 10. –P. 102504.
10. Nikitin A. A. et. al. Nonlinear frequency response of the multi-resonant ring cavities //Results in Physics. – 2020. – V. 18. – P. 103279.