

Витько В. В., Никитин А. А., Устинов А. Б., Калиникоз Б. А.
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ»

Исследование бистабильности кольцевых оптоэлектронных СВЧ резонаторов с оптической и спин-волновой нелинейностями

Проведено исследование бистабильных оптоэлектронных кольцевых резонаторов (ОКР) с спин-волновой и оптической нелинейностями. Разработана теория описывающая нелинейные передаточные характеристики ОКР, состоящих из спин-волновой линии задержки (СВ ЛЗ) и нелинейного оптического волокна. В разработанной теории были учтены как дисперсионные, так и нелинейные свойства ферритовой пленки и оптического волокна. Разработанная теория использовалась для анализа бистабильного поведения передаточных характеристик ОКР, содержащих два типа СВ ЛЗ: на прямых объемных спиновых волнах (ПОСВ) и на поверхностных спиновых волнах (ПСВ). Было показано, что использование нелинейного оптического волокна в ОКР с линией задержки на ПОСВ обеспечивает компенсацию нелинейности спиновых волн. Однако такое же нелинейное оптическое волокно в ОКР с линией задержки на ПСВ усиливало бистабильность передаточных характеристик. Экспериментально измерены передаточные характеристики ОКР, состоящих из нелинейных линий задержки на ПОСВ и ПСВ и линейного одномодового оптического волокна. Полученные теоретические результаты хорошо согласуются с экспериментом.

Ключевые слова: бистабильность, нелинейные волны, кольцевой резонатор

Бистабильные явления, возникающие в процессе распространения электромагнитных волн в различных нелинейных резонансных системах, привлекают внимание из-за ряда принципиально важных эффектов и практических применений [1] - [3]. Такие явления проявляются в кольцевых системах, электрическая длина которых значительно превышает длину волны циркулирующего в них сигнала.

До настоящего времени основное внимание уделялось оптическим кольцевым резонаторам, а именно кольцам из оптического волокна и микрокольцам (см., например, [4] – [5]). Оптическая бистабильность передаточных характеристик оптических кольцевых резонаторов появляется благодаря положительному нелинейному набегу фазы оптической волны, одной из причин которого является нелинейный эффект Керра. Этот эффект приводит к сдвигу дисперсионных характеристик в область больших волновых чисел в результате возрастания интенсивности. Это соответствует нелинейному сдвигу резонансных гармоник оптоэлектронного кольцевого резонатора (ОКР) в область низких частот. С другой стороны, бистабильное поведение СВЧ кольцевых резонаторов на спиновых волнах было исследовано только в работе [6]. Спин-волновая бистабильность возникает благодаря нелинейному фазовому набегу спиновых волн (СВ), который зависит от мощности СВЧ-сигнала, циркулирующего в кольце. Как известно, закон дисперсии СВ зависит от статической намагниченности. Следуя уравнению Ландау-Лифшица [7], длина полного вектора намагниченности сохраняется, в то время как увеличение мощности СВЧ-сигнала приводит к увеличению амплитуды СВ. Это приводит к уменьшению статической намагниченности и, следовательно, к смещению дисперсионной характеристики СВ.

Объединение спин-волновой и оптической волноведущих структур в кольцо обратной связи обеспечивает новый тип нелинейных систем, характеризующихся принципиально новыми нелинейными явлениями. Целью работы является изучение бистабильного поведения, возникающего из-за оптической и спин-волновой нелинейностей, в спин-волновом ОКР.

Общая схема исследуемого ОКР показана на рис. 1. ОКР состоит из СВЧ и оптического трактов. Оптический тракт включает в себя лазер, усилитель, нелинейное одномодовое оптическое волокно и фотодетектор. Основными элементами СВЧ тракта являются СВЧ-усилитель, управляемый аттенуатор и спин-волновая линия задержки (СВ ЛЗ). Рассмотрим циркуляцию СВЧ-сигнала в исследуемом ОКР. СВЧ-сигнал через направленный ответвитель поступает на вход лазера. Амплитудно-модулированный оптический сигнал распространяется в волокне и приобретает набег фазы $\Phi = \Phi_l + \Delta\Phi_{nl}$, где $\Phi_l = n_{eff} K l_{opt}$ – линейный набег фазы, n_{eff} – эффективный показатель преломления, K – волновое число в оптоволокне, l_{opt} – длина оптоволокна, а $\Delta\Phi_{nl} = \Upsilon P l_{opt}$ – нелинейный набег фазы. Здесь Υ – нелинейный коэффициент, а P – оптическая мощность. Оптический сигнал поступает на фотодетектор, который выделяет СВЧ-осциллирующую. Далее СВЧ-сигнал распространяется через элементы СВЧ-тракта. Проходя через СВ ЛЗ сигнал приобретает набег фазы $\varphi = \varphi_l + \Delta\varphi_{nl}$, где $\varphi_l = k_{sw} l_{sw}$ – линейный СВ набег фазы, k_{sw} – волновое число СВ, l_{sw} – длина СВ ЛЗ, $\Delta\varphi_{nl} \approx -\Delta\omega_{nl} l_{sw} / V_g$ – нелинейный СВ набег фазы, $\Delta\omega_{nl} = N |u|^2$ – нелинейный сдвиг частоты, N – кубический нелинейный коэффициент, $|u| = |m| / (\sqrt{2} M_0)$ – безразмерная амплитуда СВ, $|m|$ – амплитуда СВ, M_0 – намагнитченность насыщения, а V_g – групповая скорость СВ [8] – [10]. Затем, часть СВЧ-сигнала ответвляется из кольца посредством направленного ответвителя. Другая часть сигнала снова подается на вход лазера. В результате образуется кольцо с обратной связью, в котором усилители и переменный аттенуатор управляют обеспечивают контроль уровня циркулирующего сигнала. Распространение сигнала в одномодовом волокне описывается волновым множителем $\exp(-i(\Phi_l + \Delta\Phi_{nl}) - \alpha_{opt} l_{opt})$, где α_{opt} – оптический декремент затухания. Распространение сигнала через СВ ЛЗ, в свою очередь, описывается волновым множителем $\exp(-i(\varphi_l + \Delta\varphi_{nl}) - \alpha_{sw} l_{sw})$, где $\alpha_{sw} = 2\pi |\gamma| \Delta H / V_g$ – декремент затухания СВ, ΔH – половина ширины линии ферромагнитного резонанса, $|\gamma| = 2,8 \text{ МГц} / \text{Э}$ – гиромагнитное отношение. Все остальные элементы кольца считаются линейными, бездисперсионными и имеют пренебрежимо малый фазовый набег. Прохождение циркулирующего сигнала через усилители и аттенуатор описывается волновым множителем $\exp(g_\Sigma - a)$, где $g_\Sigma = g_{opt} + g_{mw}$ – суммарный коэффициент усиления за один оборот кольца, включающий в себя как СВЧ усиление g_{mw} , так и оптическое усиление g_{opt} , а a – коэффициент затухания за один оборот. Таким образом, выходной сигнал является суперпозицией бесконечного числа затухающих волн, циркулирующих в кольце. Коэффициент передачи по мощности в этом случае может быть записан в следующем образом:

$$H_p = \frac{1}{2} \frac{\exp(-\Lambda_\Sigma)}{\cosh(\Lambda_\Sigma) - \cos(\Phi_\Sigma)}, \quad (1)$$

где $\Lambda_{\Sigma} = \alpha_{sw}l_{sw} + \alpha_{opt}l_{opt} + a - g_{\Sigma}$ – суммарное затухание за один оборот в кольце, а $\Phi_{\Sigma} = \Phi_l + \varphi_l + \Delta\Phi_{nl} + \Delta\varphi_{nl}$ – суммарный набег фазы сигнала в оптическом и СВЧ трактах за один оборот.

Вблизи резонансных частот происходит увеличение амплитуды циркулирующего сигнала, следовательно, мощность оптического сигнала записывается как $P = P_{opt}H_p$, а безразмерная амплитуда СВ – $|u|^2 = |U|^2 H_p$, где P_{opt} – оптическая мощность, а $|U|^2$ – безразмерная амплитуда входного СВЧ-сигнала. Подстановка таких выражений в уравнения для нелинейных фазовых сдвигов позволяет получить систему двух трансцендентных уравнений. Нелинейная передаточная характеристика получается путем подстановки решения системы трансцендентных уравнений в коэффициент передачи по мощности (1).

В соответствии с целью работы, были проведены численные расчеты бистабильных передаточных характеристик для ОКР, состоящего из нелинейных оптической и спин-волновой линий задержки. При этом были рассмотрены два типа СВ ЛЗ: на прямых объемных спиновых волнах (ПОСВ) и на поверхностных спиновых волнах (ПСВ). В работе рассматривались СВ ЛЗ на основе пленки железо иттриевого граната (ЖИГ) со следующими параметрами: $M_0 = 1750$ Гс, $\Delta H = 0.5$ Э, $L = 5$ мкм, $l_{sw} = 3.9$ мм, $H_0 = 2630$ Э для ПОСВ и $H_0 = 880$ Э для ПСВ; и сильно нелинейного оптоволокна: $\Omega = 193.4$ ТГц, $n_2 = 6.3 \cdot 10^{-20}$ м²/Вт, $A_{eff} = 8.5$ мкм², а $\alpha_{opt} = 0.9$ дБ/км [11].

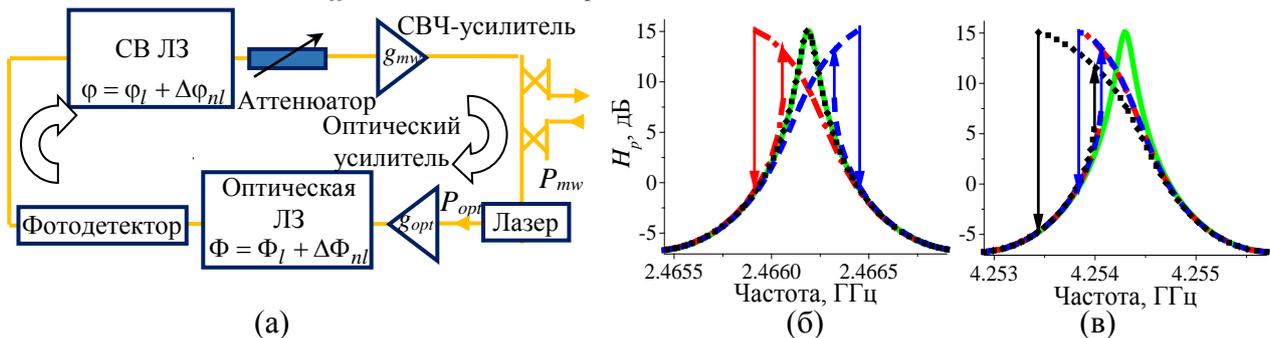


Рис. 1 – (а) Принципиальная схема спин-волнового ОКР; Передаточные характеристики (б) ОКР на ПОСВ и (в) ОКР на ПСВ.

Результаты численных расчетов передаточных характеристик ОКР на основе оптической и СВ ЛЗ на ПОСВ, а также ПСВ показаны на рис. 1б и 1в, соответственно. Так как длина рабочих волн в элементах ОКР значительно меньше электрических размеров линий задержки, то его передаточная характеристика является многочастотной и представляет собой периодическую последовательность резонансных мод, удовлетворяющих условию $\Phi_{\Sigma} = 2\pi t$, где t – номер моды. В случае полной компенсации потерь на распространение сигнала в кольце $g_{\Sigma} = \alpha_{sw}l_{sw} + \alpha_{opt}l_{opt} + a$ и $\Lambda_{\Sigma} = 0$ наблюдается режим автогенерации. В режиме, предшествующем режиму автогенерации, амплитуда СВЧ-сигнала, циркулирующего в кольце, значительно увеличивается на резонансных частотах, благодаря чему вблизи резонансных частот наблюдаются нелинейные эффекты, в том числе нелинейный набег фазы.

Рассмотрим различные режимы работы, которые реализуются благодаря оптической и спин-волновой нелинейностям. Чтобы получить линейный рабочий режим, оба нелинейных коэффициента должны быть равны нулю ($\Upsilon = N = 0$). Характеристики передачи как ОКР на ПОСВ, так и на ПСВ, соответствующие линейному рабочему режиму, показаны сплошными зелеными линиями на рис. 1б и 1в, соответственно. Если амплитуда сигнала,

циркулирующего в кольце, превышает порог нелинейных явлений, то возникает нелинейный набег фазы. Знак нелинейного набега фазы определяет знак соответствующего нелинейного сдвига резонансной частоты. Бистабильное состояние возникает в случае, если нелинейный сдвиг частоты превышает половину ширины резонансной кривой. Так, в случае только спин-волновой нелинейности ($N \neq 0, \Upsilon = 0$) увеличение амплитуды СВЧ-сигнала до $|U|^2 = 10^{-5}$ приводит к возникновению отрицательного нелинейного набега фазы для ПОСВ и положительного – для ПСВ. В этом случае знак нелинейного набега фазы определяет знак сдвига резонансной частоты, как показано синими пунктирными линиями на рис. 1б и 1в. В случае только оптической нелинейности ($N = 0, \Upsilon \neq 0$) увеличение оптической мощности до $P_{opt} = 10$ мВт приводит к смещению резонансных гармоник в область низких частот для обеих конфигураций кольца, что показано красными штрих-пунктирными линиями на рис. 1б и 1в. Включение обеих нелинейностей приводит к сложению нелинейных набегов фазы. На рис. 1б и 1в черными пунктирными линиями показаны характеристики передачи для обоих типов СВ ЛЗ. Из рис. 2б видно, что нелинейная передаточная характеристика почти идеально симметрична и совпадает с линейной. Это является результатом компенсации нелинейного набега фазы оптических волн нелинейным набегом фазы СВ. В случае ОКР на ПСВ комбинация одинаковых по модулю нелинейных набегов фазы приводит к усилению бистабильного поведения.

Для проверки адекватности разработанной теории были проведены экспериментальные исследования передаточных характеристик оптоэлектронного кольцевого резонатора, который включал нелинейную СВ ЛЗ и волоконно-оптическую линию задержки, работающую в линейном режиме. Оптический тракт состоял из электрооптического модулятора Маха-Цендера с полосой частот 10 ГГц, одномодового оптоволокна длиной 100 м, фотодетектора с полосой частот 10 ГГц и лазера с мощностью излучения $P_{opt} = 10$ дБм на рабочей частоте 193,4 ТГц. СВ ЛЗ состояла из эпитаксиальной пленки ЖИГ толщиной 5 мкм и шириной 1,6 мм на подложке гадолиний галлиевого граната и двух микрополосковых антенн шириной 50 мкм и длиной 2 мм, расположенных на расстоянии 4 мм друг от друга. В случае ПОСВ магнитное поле напряженностью 2630 Э было направлено по нормали к пленке ЖИГ. В случае ПСВ пленка ЖИГ помещалась в магнитное поле напряженностью 880 Э, направленное по касательной.

Измерения, проведенные на предварительном этапе показали, что все элементы исследуемого ОКР, за исключением СВ ЛЗ, работали в линейном режиме. Экспериментально измеренные передаточные характеристики ОКР на ПОСВ и ПСВ, полученные для различных значений коэффициента затухания, представлены на рис. 2а и 2б, соответственно. Как видно из рис. 2а уменьшение коэффициента затухания для ОКР на ПОСВ приводило к нелинейному сдвигу резонансной частоты в область высоких частот. Его максимальное значение составляло 71 кГц. Однако, в случае ОКР на ПСВ был зафиксирован нелинейный сдвиг резонансной частоты в область низких частот, он составил 7 кГц. Экспериментально полученные передаточные характеристики сравнивались с теоретическими, рассчитанными для экспериментальных параметров. Из рис. 2а и 2б видно, что теоретические и экспериментальные результаты хорошо согласуются.

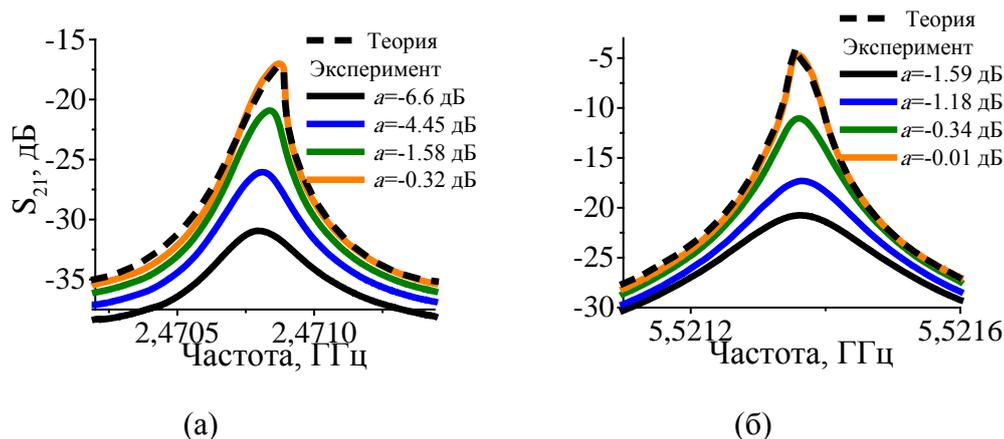


Рис. 2 – Экспериментально измеренные передаточные характеристики ОКР с линейным оптоволоконном и нелинейной СВ ЛЗ (а) на ПОСВ и (б) на ПСВ.

В заключение отметим, что разработана теория, описывающая нелинейные передаточные характеристики оптоэлектронных кольцевых резонаторов на спин-волновых и оптических линиях задержки с учетом как спин-волнового, так и оптического нелинейных фазовых набегов. Разработанная теория была использована для исследования бистабильного поведения оптоэлектронных кольцевых резонаторов с линиями задержки на ПОСВ и ПСВ, а также сильно нелинейного оптического волокна. Было показано, что в случае оптоэлектронного резонатора на ПСВ наблюдается усиление бистабильности. А в случае оптоэлектронного резонатора на ПОСВ благодаря противоположным по знаку спин-волновому и оптическому нелинейному набегу фазы происходит их конкуренция, что при определенных параметрах приводит к подавлению бистабильности. Для проверки разработанной теории были проведены экспериментальные измерения передаточных характеристик спин-волновых оптоэлектронных кольцевых резонаторов. Результаты теоретических исследований хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (грант №16-12-10440).

Библиографический список

1. H. Gibbs, Optical bistability: controlling light with light, Elsevier, 2012.
2. I. D. Mayergoyz, G. Bertotti, and C. Serpico, Nonlinear magnetization dynamics in nanosystems, Elsevier, 2009.
3. C. M. Bowden, M. Ciftan, and H. R. Robl, Optical bistability, Springer Science & Business Media, 2012.
4. S. Li, Q. Ge, Z. Wang, J. C. Martín, and B. Yu, "Optical bistability via an external control field in all-fiber ring cavity", Scientific Reports, 2017, vol. 7, is. 1, p. 8992.
5. V. R. Almeida and M. Lipson, "Optical bistability on a silicon chip," Optics letters, 2004, vol. 29, is. 20, pp. 2387-2389.
6. P. A. P. Janantha, B. A. Kalinikos, and M. Wu, "Foldover of nonlinear eigenmodes in magnetic thin film based feedback rings," Physical Review B, 2017, vol. 95, is. 6, p. 064422.
7. D. D. Stancil and A. Prabhakar, Spin Waves: Theory and Applications, Springer, New York, 2009.
8. M. M. Scott, C. E. Patton, M. P. Kostylev, and B. A. Kalinikos, "Nonlinear damping of high-power magnetostatic waves in yttrium-iron-garnet films," J. Appl. Phys., 2004, vol. 95, is. 17, p.6294.
9. A. B. Ustinov and B. A. Kalinikos, "Power-dependent switching of microwave signals in a ferrite-film nonlinear directional coupler," Appl. Phys. Lett., 2006, vol. 89, is. 17, p.172511.
10. A. B. Ustinov and B. A. Kalinikos, "A microwave nonlinear phase shifter," Appl. Phys. Lett., 2008, vol. 93, is.10, p. 102504.
11. Y. Yamamoto, Y. Tamura, and T. Hasegawa, "Silica-based highly nonlinear fibers and their applications," SEI Tech. Rev., 2016, vol. 83, pp. 15-20.