

Исследование нелинейного магنونного фазовращателя на прямых объемных спиновых волнах

Р.В. Гапончик, А.Б. Устинов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Аннотация: в данной работе разработана теоретическая модель и экспериментальный прототип нелинейного фазовращателя, принцип действия которого основан на эффекте наведенного нелинейного сдвига фазы прямых объемных спиновых волн, распространяющихся в одномерном магنونном кристалле.

Ключевые слова: магنونика, нелинейные спиновые волны, железо-иттриевый гранат

1. Введение

В последнее десятилетие наблюдается повышенный интерес к исследованиям нелинейных свойств спиновых волн (СВ), распространяющихся в магنونных кристаллах (МК). Были исследованы такие нелинейные явления, как солитоны огибающей [1-3] и нелинейный сдвиг собственных частот интенсивных СВ [4]. Однако ряд важных вопросов остается неизученным. К ним относятся задачи исследования нелинейного сдвига фазы СВ малой амплитуды, наведенного спиновой волной накачки большой амплитуды, распространяющихся в МК на разных частотах, с учетом нелинейного затухания волны накачки. Интерес к исследованию обусловлен необходимостью разработки магنونных логических схем, в которых бы выходной магنونный сигнал предыдущего логического элемента управлял бы магنونным сигналом последующего логического элемента [5].

Целью настоящей работы является разработка теоретической модели и экспериментального прототипа нелинейного фазовращателя (ФВ), принцип действия которого основан на эффекте наведенного нелинейного сдвига фазы прямых объемных СВ, распространяющихся в одномерном МК.

2. Построение модели

Построение модели проводилось в несколько этапов. Поскольку нелинейный фазовый набег СВ малой амплитуды зависит от эволюции амплитуды СВ накачки большой амплитуды при их одновременном распространении в МК, сначала был проведен вывод формул для нелинейного затухания СВ в регулярном волноводе из магнитной пленки. Чтобы описать распространение двух нелинейно связанных волн, была использована система модифицированных нелинейных уравнений Гинзбурга-Ландау. Затем описывался наведенный нелинейный сдвиг фазы СВ с учетом нелинейного затухания волны накачки. На последнем этапе было учтено дополнительное затухание волны накачки за счет Брэгговского отражения при ее распространении на частотах запрещенных зон МК. Для этого коэффициент передачи МК был записан в виде произведения нескольких слагаемых, описывающих нелинейное затухание СВ и затухание, связанное с их отражением. Отражение СВ от периодической структуры описывалось с помощью метода связанных волн [6].

3. Экспериментальное исследование

Экспериментальный макет нелинейного магнонного ФВ был собран с применением МК, изготовленного из пленки ЖИГ толщиной 5.7 мкм. На поверхности плёнки были вытравлены 10 канавок глубиной 0.1 мкм и периодом 300 мкм. Ширина канавок составляла 100 мкм. Для возбуждения и приёма прямых объемных СВ использовались микрополосковые антенны длиной 2 мм и шириной 50 мкм. Антенны были нанесены непосредственно на МК, а расстояние между ними составляло 3 мм. Намагниченность насыщения выбранной плёнки ЖИГ равнялась 1400 Гс, а величина внешнего магнитного поля 2500 Э. Полуширина кривой ферромагнитного резонанса составляла 0.6 Э.

Измерения проводились в два этапа. На первом этапе вход и выход экспериментального макета подключались напрямую к векторному анализатору цепей. Измерялись АЧХ и ФЧХ исследуемого макета. На втором этапе проводились измерения наведенного нелинейного сдвига фазы СВ в МК. Векторный анализатор цепей переводился в режим измерения фазы от времени. В этом режиме векторный генератор цепей генерировал непрерывный маломощный СВЧ-сигнал. В то же время, СВЧ-генератор генерировал импульсный СВЧ-сигнал, дополнительно усиливаемый с помощью усилителя. Таким образом, в пленке ЖИГ происходило одновременное возбуждение непрерывной рабочей СВ и относительно интенсивных СВ импульсов накачки. В итоге на экране векторного анализатора наблюдались зависимость фазы рабочего СВЧ-сигнала от времени.

4. Заключение

Впервые, с использованием оригинальной методики, был измерен наведенный нелинейный сдвиг фазы рабочей прямой объемной СВ в МК. Экспериментальные данные показали, что величина наведенного нелинейного сдвига фазы растет с увеличением частоты рабочего сигнала. Если частоту СВ накачки установить в центр запрещенной зоны МК, то наблюдается уменьшение наведенного нелинейного сдвига фазы. Экспериментальные результаты хорошо согласуются с теорией.

Работа частично поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (проект "Госзадание", грант № FSEE-2020-0005).

Список литературы

1. Устинов, А.Б. Наблюдение солитонов огибающей спиновых волн в периодических магнитных пленочных структурах // Письма в журнал экспериментальной и теоретической физики, –2008. – Т. 88, –Вып. 1, –С. 34-39.
2. Морозова, М.А. Механизмы формирования солитонов огибающей в периодических ферромагнитных структурах // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика, –2010. –Т. 18, – № 5, –С. 113-124.
3. Grishin, S.V. Self-Generation of Chaotic Dissipative Soliton Trains in Active Ring Resonator With 1-D Magnonic Crystal // IEEE Trans. Mag. –2011. –Vol. 47, –№ 10, P. 3716-3719.
4. Ustinov, A.B. Multifunctional nonlinear magnonic devices for microwave signal processing // Appl. Phys. Lett. –2010. –Vol. 96, –P. 142513.
5. Mahmoud, A. Fan-out enabled spin wave majority gate // AIP Advances. –2020. –Vol. 96, –№ 3, –P. 035119.
6. Yariv, A. Coupled-mode theory for guided-wave optics // IEEE J. Quant. El. –1973. –Vol. QE-9, P. 919-933.