

Козин А.Э.<sup>1,2</sup>, Устинов А.Б.<sup>1,2</sup>, Фирсенков А.И.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный электротехнический

университет «ЛЭТИ»

<sup>2</sup>ОАО «Завод Магнетон»

## Экспериментальное исследование нелинейного затухания интенсивных спиновых волн в экранированных ферритовых пленках

*Экспериментально исследовано нелинейное затухание поверхностных спиновых волн в экранированных пленках железо-иттриевого граната. Показано, что для пленок микронной толщины при увеличении мощности до 15 дВт вносимые потери возрастают на 2-5 дВ.*

**Ключевые слова:** магнитоэлектрические спиновые волны, ферритовые пленки, линия задержки, ограничитель мощности

Спиновые волны (СВ), распространяющиеся в эпитаксиальных ферритовых пленках, имеют широкие возможности применения для обработки и генерации сверхвысокочастотных (СВЧ) сигналов. Разнообразие дисперсионных и нелинейных свойств СВ позволили создать различные СВЧ приборы, такие как фильтры, линии задержки, фазовращатели, шумоподавители и ограничители мощности [1-3]. Для возбуждения СВ обычно используются антенны, выполненные в виде отрезков одиночных и многоэлементных микрополосковых линий, щелевых линий, копланарных волноводов, а также их комбинаций [4, 5].

В последние годы возрос интерес к применению нелинейных свойств СВ для создания приборов обработки СВЧ сигналов [6-10]. Принцип действия перечисленных выше устройств основан на эффекте нелинейного фазового набега интенсивных СВ [2,9]. На величину нелинейного фазового набега влияет нелинейное затухание СВ [2]. К настоящему моменту времени такие нелинейные процессы достаточно хорошо изучены в неэкранированных пленках. В экранированных пленках они до сих пор не изучались.

Целью данной работы являлось экспериментальное исследование нелинейного затухания поверхностных СВ в ферритовых пленках, вблизи поверхности которых расположен металлический экран.

Экспериментальные исследования проводились на макете, представлявшем собой линию задержки (см. рис.1) на основе пленки железо-иттриевого граната (ЖИГ). В эксперименте использовались волноводы СВ (1), изготовленные из эпитаксиальных пленок ЖИГ двух толщин  $L_1 = 5.2 \mu\text{m}$  и  $L_2 = 3.1 \mu\text{m}$  с намагниченностью насыщения  $4\pi M_s = 1750 \text{Gs}$  и линейным параметром диссипации около  $\Delta H = 0,5 \text{Oe}$ . Ширина волноводов была  $3 \text{mm}$ , длина -  $30 \text{mm}$ . Для возбуждения и приема СВ использовались копланарные короткозамкнутые антенны (2) с шириной центрального проводника  $100 \mu\text{m}$  и шириной щелей  $50 \mu\text{m}$ . Расстояние между антеннами  $d$  составляло  $4 \text{mm}$ , а длина антенн равнялась  $3 \text{mm}$ . Подвод СВЧ мощности к антеннам осуществлялся копланарными линиями с волноводным сопротивлением  $50 \Omega$ . Антенны и подводящие линии были выполнены методом фотолитографии на подложке из поликора толщиной  $0.5 \text{mm}$ . Макет помещался в постоянное магнитное поле электромагнита (3), направленное в плоскости пленки параллельно антеннам и перпендикулярно направлению распространения СВ. Такая

взаимная ориентация постоянного магнитного поля и пленки соответствует распространению в ней поверхностных СВ. Значение напряженности магнитного поля  $H_0$  составляло около  $1050 \text{ Oe}$ .

Необходимо отметить две существенные особенности экспериментального макета. Во-первых, при использовании копланарных антенн одна из сторон пленки оказывается экранированной металлической плоскостью, что приводит к увеличению групповой скорости СВ и расширению области их возбуждения. Во-вторых, поверхностные СВ хорошо "чувствуют" близость экрана у поверхности пленки в силу экспоненциального распределения амплитуды переменной намагниченности по толщине пленки с максимумом на ее поверхности.

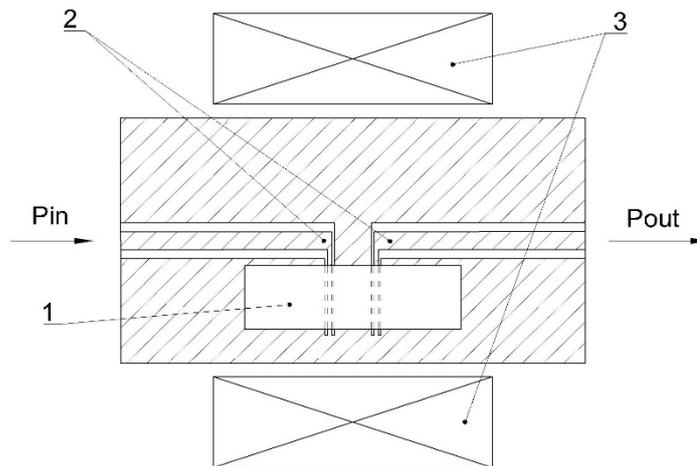


Рис. 1. Блок – схема экспериментального макета.

В ходе исследований измерялись  $S$ -параметры экспериментального макета на векторном анализаторе цепей R&S ZVB 20. Частотные зависимости вносимых и обратных потерь макета, измеренные при различных уровнях мощности СВЧ сигнала, приведены на рис. 2.

Из графиков видно, что полоса пропускания устройства составляла около  $250 \text{ MHz}$  по уровню минус  $50 \text{ dB}$  с центральной частотой  $5050 \text{ MHz}$  для волновода толщиной  $L_1$  и  $4950 \text{ MHz}$  для волновода толщиной  $L_2$ . Вносимые потери на центральной частоте полосы пропускания при сравнительно низком уровне входной мощности  $0 \text{ dBm}$  для обоих волноводов совпадали и составляли  $7.5 \text{ dB}$ . Максимум обратных потерь составлял  $11 \text{ dB}$  для пленки толщиной  $L_1$  и  $9 \text{ dB}$  для пленки толщиной  $L_2$ .

При сравнительно низком уровне мощности (не более  $0 \text{ dBm}$ ) СВ распространялись в линейном режиме. В таком режиме вносимые потери не зависели от уровня мощности. Увеличение мощности входного сигнала выше  $0 \text{ dBm}$  приводило к плавному росту вносимых потерь. Так, для волновода СВ толщиной  $L_1$  при увеличении мощности до  $15 \text{ dBm}$  потери на частоте  $5050 \text{ MHz}$  возрастали на  $2 \text{ dB}$ . Для волновода толщиной  $L_2$  при увеличении мощности до  $15 \text{ dBm}$  потери на частоте  $4950 \text{ MHz}$  возрастали на  $5 \text{ dB}$ . Такое поведение обусловлено нелинейными затуханием СВ. Из рис. 2 видно, что эффект нелинейного затухания сильнее выражен для более тонкой пленки. Это объясняется более высокой плотностью мощности СВ в пленке меньшей толщины. В нелинейном режиме работы устройства при увеличении мощности входного сигнала также наблюдался незначительный спад обратных потерь. Это было учтено при расчете характеристик распространения интенсивных СВ.

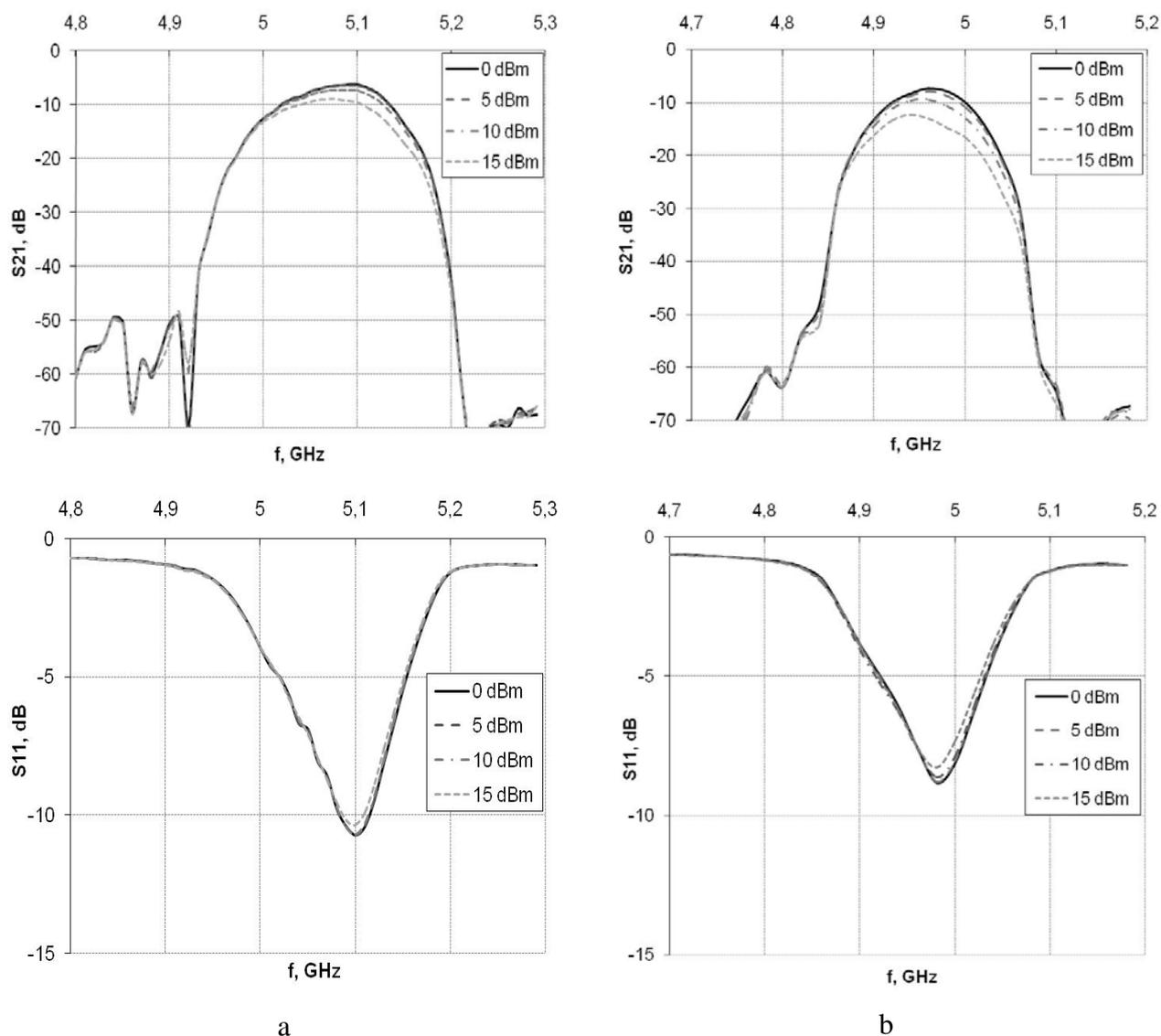


Рис.2. Вносимые потери (сверху) и обратные потери (снизу) в зависимости от частоты, измеренные при различных мощностях СВЧ сигнала для пленок ЖИГ толщинами:  $L_1 = 5.2 \mu\text{m}$  (a);  $L_2 = 3.1 \mu\text{m}$  (b)

Из проведенного исследования следует, что экранированные ферритовые пленки могут ограничивать мощность СВЧ сигнала, переносимого спиновыми волнами. С уменьшением толщины пленки уровень ограничения мощности уменьшается. Изменяя величину поля подмагничивания, возможно выбирать частоты, на которых происходит ограничение мощности. Таким образом, экранированные ферритовые пленки могут применяться для построения различных нелинейных устройств обработки СВЧ сигналов. В качестве примера можно назвать ограничители мощности.

Работы, проведенные в СПбГЭТУ, выполнены при поддержке госзадания Минобрнауки РФ.

#### Библиографический список

1. Исхак У.С. Применение МСВ: Обзор // ТИИЭР тематический выпуск, 1988, т.76, №2, с.86-104.
2. Калиникос Б.А, Устинов А.Б. Баруздин С.А. Спин-волновые устройства и эхо-процессоры. Монография / Под ред. В.Н. Ушакова. - М.: Радиотехника, 2013
3. Никитов С.А. Магноника - новое направление спинтроники и спин-волновой электроники / Никитов С.А. [и др.]. // УФН 185 1099–1128 (2015)
4. Дмитриев В.Ф., Калиникос Б.А. Возбуждение распространяющихся волн намагниченности микрополосковыми антеннами // Изв. вузов. Физика.1988. №11. С24-53.

5. *Дмитриев В.Ф.* Селективные свойства спин-волновых устройств на основе щелевых и копланарных линий // Радиотехника и электроника. - 1990,-Т.35, № 9.- С.1821-1828.
6. *Ustinov A.B. and Kalinikos B.A.* A microwave nonlinear phase shifter // Appl. Phys. Lett. 93, 102504 (2008)
7. *Kuanr B.K., Anderson N.R., Celinski Z.J. and Camley R.E.* Monolithic Microwave Nonlinear Phase Shifter // IEEE Magnetics Letters, V. 6 (2015) 3500304
8. *Hansen U.H., Demidov V.E. and Demokritov S.O.* Dual-function phase shifter for spin-wave logic applications // Appl. Phys. Lett. 94, 252502 (2009).
9. *Ustinov A.B. and Kalinikos B.A.* Power-dependent switching of microwave signals in a ferrite-film nonlinear directional coupler // Appl. Phys. Lett. 89, 172511 (2006)
10. *A.V. Sadovnikov, S.A. Odintsov, E.N. Beginin et. al.* // Phys. Rev. B, V. 96, 144428 (2017).