

**Е.Н.Бегинин¹, А.В. Садовников¹, Ю.П. Шараевский¹,
С.А. Никитов^{1,2}**

¹ФГБОУ ВПО Саратовский государственный университет
им. Н.Г. Чернышевского

²Институт радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН

Многомодовое распространение поверхностных магнитостатических волн в нерегулярных узких ферритовых волноводах

Методом бриллюэновской спектроскопии проведено экспериментальное исследование особенностей многомодового распространения поверхностной магнитостатической волны в нерегулярном ферритовом волноводе.

Ключевые слова: железо-иттриевый гранат, магнитостатические волны, бриллюэновское рассеяние света, нерегулярный волновод, волноводные моды

Планарные ферритовые волноводы на основе тонких пленок железо-иттриевого граната (ЖИГ) могут быть использованы как базовые элементы для создания различных устройств функциональной магнитоэлектроники: волноводов, дисперсионных и бездисперсионных линий задержки, фильтров, ответвителей и т.д. [1] Перестройка рабочих частот таких устройств внешним магнитным полем, разнообразие типов и характера дисперсии распространяющихся волн (поверхностные и объемные, прямые и обратные), проявление различных нелинейных эффектов (солитонное распространение волн, самомодуляция) позволяют изменять их характеристики и режимы работы в широких пределах. Применительно к тонкопленочным ферритовым волноводам ограниченной ширины основной задачей является определение спектра и дисперсионных характеристик волноводных мод, группового времени запаздывания, коэффициентов затухания и условий возбуждения. В работах [2,3] теоретически и экспериментально исследовался спектр и характеристики возбуждения поверхностных магнитостатических волн (ПМСВ) микрополосковыми антеннами в регулярных поперечно-ограниченных ферритовых волноводах и показано, что возбуждение и распространение ПМСВ имеет многомодовый характер.

Экспериментальное измерение пространственного распределения амплитуд волн можно провести различными методами, например, СВЧ-зондами. Однако, с уменьшением геометрических размеров волноводов менее 500 мкм, пространственное разрешение зондовых методов становится недостаточным. В настоящее время, для исследования пространственных характеристик волн в волноводах микронных и субмикронных размеров, широко используется метод бриллюэновской спектроскопии магнитных материалов (BLS) [4].

В данной работе представлены результаты исследования методом BLS (конфигурация обратного рассеяния) особенностей многомодового распространения

ПМСВ в регулярном и нерегулярном планарных ЖИГ-волноводах в различных частотных диапазонах.

Планарные волноводы были изготовлены из пленок ЖИГ методом лазерного скрайбирования. Регулярный волновод имел форму равнобедренной трапеции с геометрическими размерами (ширина и длина по основанию) $1 \times 5 \text{ мм}^2$, толщина феррита $d=7.7 \text{ мкм}$, намагниченность насыщения $4\pi M_0=1750 \text{ Гс}$. Нерегулярный волновод представлял собой соединение двух регулярных волноводов различной ширины через области согласования с линейным изменением ширины ферритовой пленки вдоль направления распространения волны. Геометрические размеры нерегулярного волновода в миллиметрах указаны на рис. 1, толщина феррита $d=10 \text{ мкм}$, $4\pi M_0=1350 \text{ Гс}$.

Возбуждение ПМСВ СВЧ-сигналом частоты f проводилось микрополосковыми антеннами шириной 30 мкм . Волноводы с антеннами размещались в однородном магнитном поле H_0 , направленном вдоль микрополосковых антенн. Пространственно-временное распределение высокочастотной намагниченности $\mathbf{m}(t, y, z)$ ПМСВ в волноводе измерялось путем сканирования сфокусированного лазерного пучка по поверхности волновода и измерением частотного спектра и интенсивности неупруго рассеянного света $I(t, y, z)$:

$$I(t, y, z) \sim |\mathbf{m}(t, y, z)|^2. \quad (1)$$

На рис. 1 показаны конфигурация обратного рассеяния BLS используемого в эксперименте и пример спектра рассеянного света включающего только стоксовую компоненту (врезка).

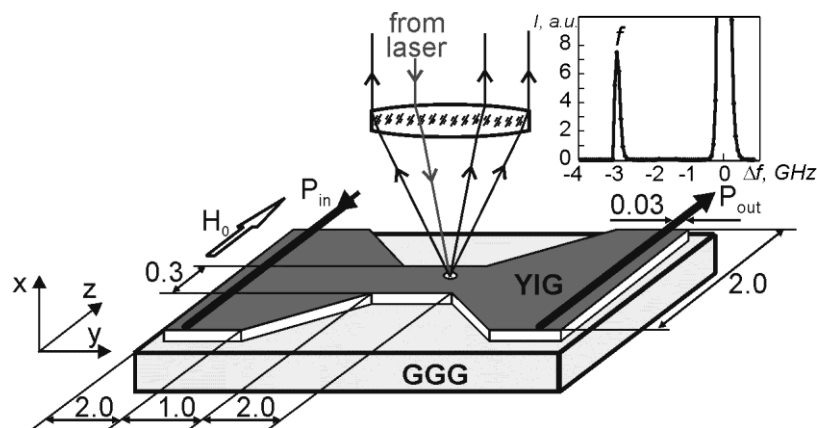


Рисунок 1

На рис. 2а представлены результаты измерений стационарного пространственного распределения величины $I(y, z)$ для ПМСВ распространяющейся в регулярном волноводе при гармоническом входном сигнале частотой $f=2.87 \text{ ГГц}$ и входной мощностью -20 дБм (линейный режим распространения) при внешнем поле $H_0=440 \text{ Э}$

(темные области соответствуют большим значениям $I(y, z)$). В общем случае намагниченность в волноводе представляет собой суперпозицию волноводных мод $\mathbf{m}(y, z) = \sum_n \alpha_n(z) \mathbf{m}_n(y) e^{-ik_n y}$, где $\alpha_n(z) \sim \sin(n\pi z/w)$ – амплитудный коэффициент, $n=1, 2, 3, \dots$ – номер моды, w – ширина волновода, k_n – волновое число [2]. Экспериментально наблюдаемое пространственное распределение намагниченности соответствует суперпозиции нечетных ширинных мод ПМСВ с номерами $n=1$ и $n=3$, длиной биений $L=1.4$ мм и симметричных относительно продольной оси симметрии регулярного волновода. На рис. 2б, для данного волновода представлены результаты расчета дисперсии ПМСВ полученные исходя из [2,3] и отмечены частота и значения волновых чисел ПМСВ для указанных мод. Проведенный теоретический расчет длины биений дает значение $L = 2\pi/|k_1 - k_3| = 1.6$ мм, что хорошо согласуется с экспериментальными результатами.

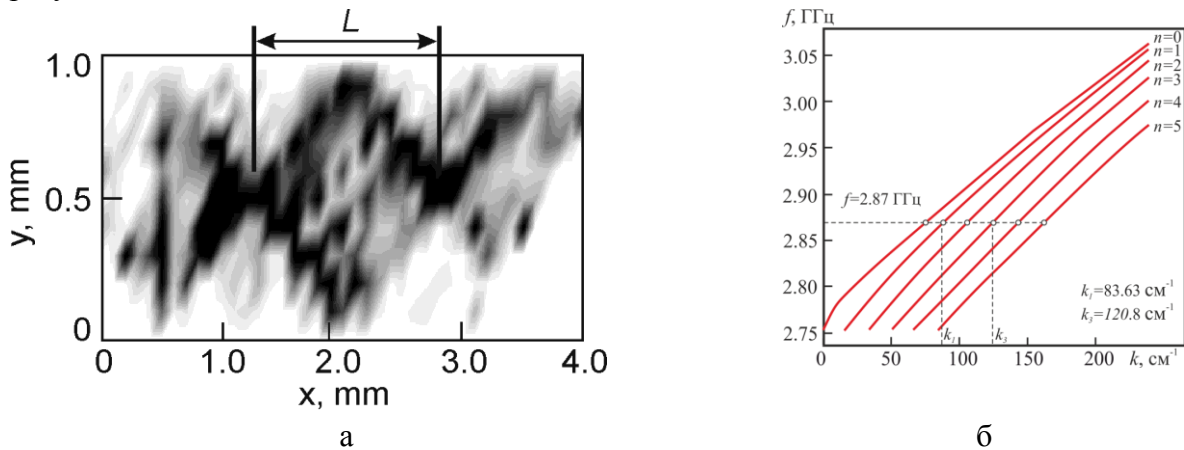


Рисунок 2

Электродинамические характеристики (рис. 3) нерегулярного волновода при различных значениях величины внешнего магнитного поля ($H_0 = 490$ Э (рис. 3а), $H_0 = 1500$ Э (рис. 3б)) были измерены векторным анализатором цепей в линейном режиме распространения ПМСВ ($P_{in} = -30$ дБм). Сплошной кривой показаны частотные зависимости коэффициента прохождения S_{21} сигнала, пунктирной – группового времени задержки τ . Полоса возбуждения ПМСВ, в зависимости от магнитного поля, составляет величину 100-500 МГц по основанию, минимальные вносимые потери 12 –15 дБ, групповая задержка 200-800 нс. Эти характеристики исследуемого нерегулярного волновода типичны для волноводов ПМСВ построенных на основе ферритовых волноводов постоянной ширины.

На рис 4.а представлены результаты экспериментального измерения стационарного пространственного распределения намагниченности ПМСВ для нерегулярного волновода для частоты $f=2.872$ ГГц при поле $H_0 = 490$ Э. Антенна находилась в области регулярного волновода шириной 2 мм (на рисунке не отображена). В области регулярного волновода наблюдалась суперпозиция мод ПМСВ с $n=1$ и $n=3$ как и в ранее рассмотренном случае. В области согласования, где ширина волновода линейно уменьшалась с 2 мм до 0.3 мм,

распределение намагниченности сохраняло симметричный относительно оси волновода вид и наблюдалось увеличение амплитуды намагниченности на краях области. На рис. 4б представлены зависимость величины I от координаты y при приближении к началу узкого волновода вдоль его оси симметрии ($z=1$ мм) (кружками– измеренные значения, сплошная линия– аппроксимированная зависимость). С ростом координаты y наблюдается увеличение амплитуд намагниченности на оси волновода и соответственно рост величины I . Относительно исходного значения ($y=0$ мм) наблюдается рост интенсивности I в ~ 50 раз ($y=1.6$ мм).

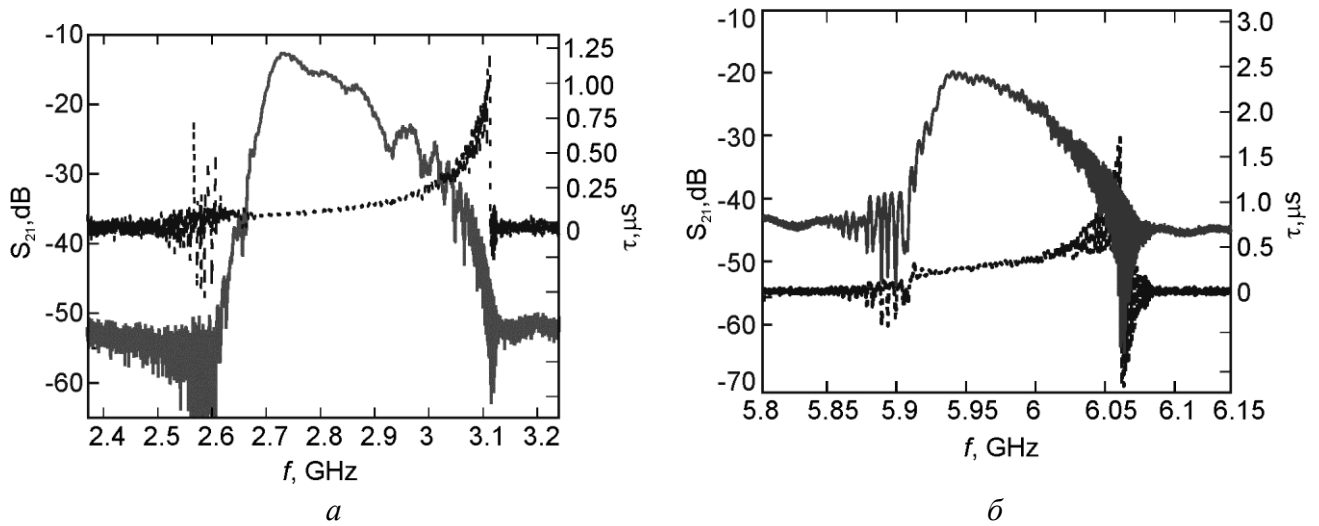


Рисунок 3

Внутри узкого волновода распределение намагниченности соответствует суперпозиции мод ПМСВ с номерами $n=1$ и $n=2$ (рис. 4а) и длиной биений $L=0.5$ мм. Расчет волновых чисел указанных мод дает значение длины биений $L=0.63$ мм, что также согласуется с экспериментальными данными. Следует отметить, что в этом случае наблюдается нарушение симметрии пространственного распределения намагниченности относительно продольной оси нерегулярного волновода.

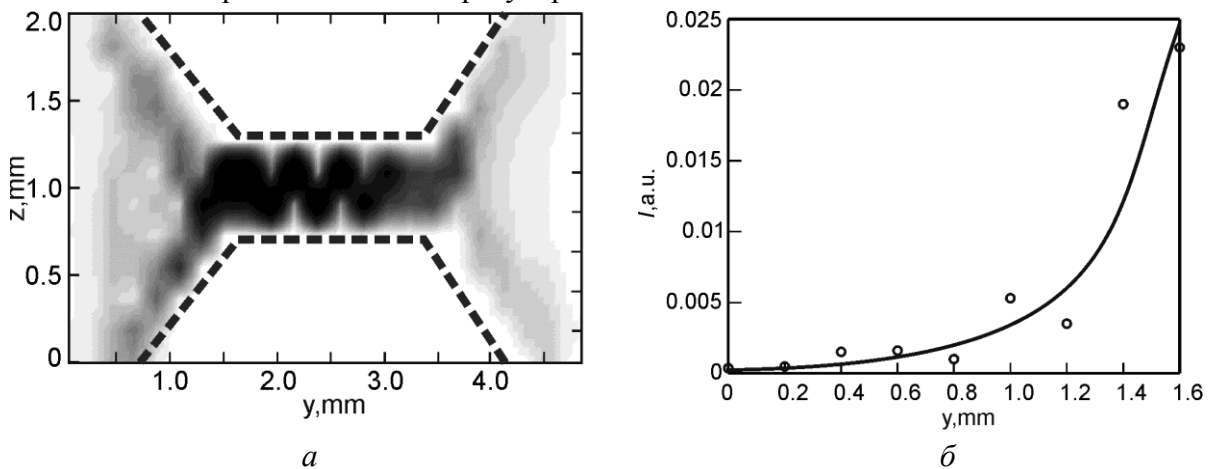


Рисунок 4

На рис. 5а представлены экспериментальные результаты измерения распределения намагниченности в области узкого волновода при поле $H_0=1500$ Э на трех различных частотах гармонических входных сигналов. Распределение намагниченности в узком волноводе в области малых волновых чисел ПМСВ (на частоте $f=5.94$ ГГц вблизи начала спектра) имеет сложный пространственный характер без явно выделения доминантных мод. Можно предположить, что в области начала узкого волновода эффективно возбуждается большое число мод и по длине узкого волновода не успевает сформироваться регулярная пространственная картина биений. В области средних волновых чисел (на частоте $f=6.005$ ГГц) в узком волноводе наблюдается пространственное распределение продольно затухающих мод с номерами $n=1, n=2$ (подобное как на рис.4а) и длиной биений $L=0.2$ мм. В области больших волновых чисел (на частоте $f=6.051$ ГГц вблизи верхней граничной частоты существования ПМСВ) моды вдоль волновода быстро затухают (см. рис. 3б) без формирования пространственной картины биений. На рис. 5б представлен расчет зависимости длины биений L от частоты (при поле $H_0=1500$ Э). С ростом частоты длина биений уменьшается.

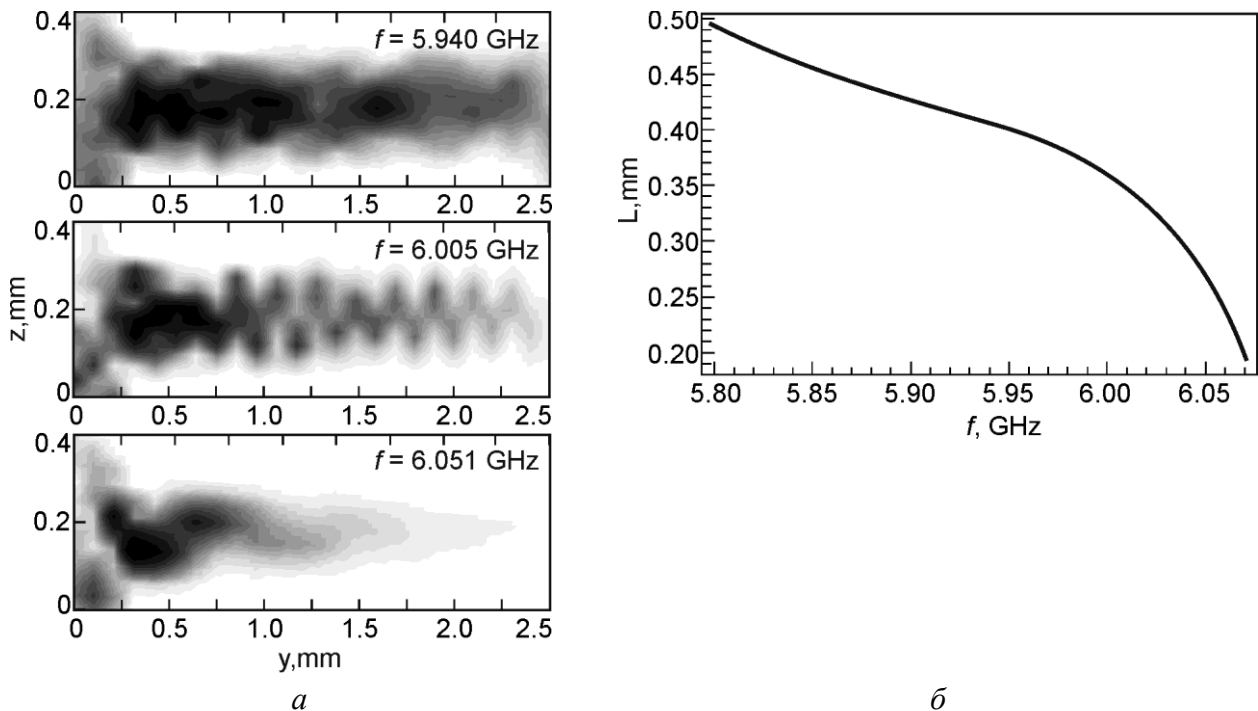


Рисунок 5

Экспериментальные исследования ферритовых волноводов показали, что в случае регулярного волновода постоянной ширины наблюдается пространственная картина биений мод ПМСВ с номерами $n=1, n=3$. В случае нерегулярного волновода при переходе от широкой к узкой части волновода наблюдается трансформация пространственной картины биений с нарушением осевой симметрии (моды ПМСВ с номерами $n=1, n=3$ широкого волновода трансформируются в моды ПМСВ с номерами $n=1, n=2$ узкого волновода).

Данный факт можно объяснить нарушением осевой симметрии нерегулярного волновода. Например, малым отклонением продольной оси волновода от нормали к внешнему магнитному полю. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (12-07-31009), Правительства РФ (№ 11.G34.31.0030) и ФЦП (ГК № 14.740.11.1078).

Библиографический список

1. Lenk B., The building blocks of magnonics / B. Lenk, H. Ulrichs, F. Garbs, M. Münzenberg // – Physics Reports – 2011. – Vol. 507. – pp. 107–136.
2. O’Keeffe T.W. Magnetostatic surface-wave propagation in finite samples / T.W. O’Keeffe, R.W.Patterson // – J. Appl. Phys. – 1978. – Vol.67. –№9.– pp. 4868-4895.
3. Bajpai S.N. Excitation of magnetostatic surface waves: Effect of finite sample width/ S.N.Bajpai // –J. Appl. Phys. – 1985. – Vol.52. –№2.– pp. 910-913.
4. Demokritov S.O. Brillouin light scattering studies of confined spin waves: linear and nonlinear confinement / S.O. Demokritov, B. Hillebrands, A. N. Slavin // – Phys. Rep. – 2001. – Vol. 348. – pp. 441–489.