УДК 537.632

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ПОВЕРХНОСТНЫХ МАГНИТОСТАТИЧЕСКИХ СПИНОВЫХ ВОЛН НА ФОРМИРОВАНИЕ ДЕФЕКТНЫХ МОД В ОДНОМЕРНЫХ МАГНОННЫХ КРИСТАЛЛАХ С ДЕФЕКТАМИ

Е. С. Павлов[1], *С. Л. Высоцкий*[1,2], *А. В. Кожевников*[1], *Г. М. Дудко*[1], *Ю. А. Филимонов*[1,2]

[1]Институт радиотехники и электроники им. Котельникова РАН Саратовское отделение
Россия, 410019 Саратов, ул. Зеленая, 38
[2]Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского
Россия, 410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
E-mail: gekapavlov@gmail.com, vysotsl@gmail.com, kzhavl@gmail.com, dugal_2010@hotmail.com, yuri.a.filimonov@gmail.com

Экспериментально исследуется влияние трех- и четырехмагнонных процессов на возбуждение дефектной моды в одномерном магнонном кристалле со структурным дефектом.

Интерес к исследованиям магнонных кристаллов с дефектами обусловлен возможностью возбуждения в запрещённых зонах дефектных мод, которые могут использоваться для усиления нелинейных эффектов и управления сигналами в СВЧ диапазоне.

Исследуемая структура получена с помощью вытравливания периодической решетки канавок с периодом 150 мкм, в центре которой был сформирован дефект (шириной, равной периоду решетки) в виде пропуска одной канавки. В геометрии возбуждения поверхностных магнитостатических спиновых волн с помощью векторного анализатора цепей снимались частотные зависимости коэффициентов прохождения и отражения в зависимости от уровня мощности сигнала накачки.

Обнаружено, что трехмагнонный распад ПМСВ приводит к разрушению резонаторных (дефектных) мод. Пороговая мощность накачки для трехмагнонных процессов меньше значений для разрушения брэгговского резонанса, что объясняется эффектом локального усиления поля спиновой волны и формированием неравновесного участка распространения спиновых волн в области дефекта. В условиях четырехмагнонных распадов при больших уровнях надкритичности накачки обнаружен сдвиг дефектной моды вместе с полосой брэгговского резонанса в сторону длинноволновой границы, что объясняется сдвигом дисперсии волны накачки при больших углах прецессии намагниченности.

Ключевые слова: Дефектная мода, магнонный кристалл, параметрическая неустойчивость.

DOI: 10.18500/0869-6632-2017-25-2-74-88

Образец цитирования: Павлов Е.С., Высоцкий С.Л., Кожевников А.В., Дудко Г.М., Филимонов Ю.А. Влияние параметрической неустойчивости поверхностных магнитостатических спиновых волн на формирование дефектных мод в одномерных магнонных кристаллах с дефектами // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2017. Т. 25, № 2. С. 74–88.

© *Е.С. Павлов, С.Л. Высоцкий, А.В. Кожевников, Г.М. Дудко, Ю.А. Филимонов*

INFLUENCE OF PARAMETRIC INSTABILITY OF MAGNETOSTATIC SURFACE SPIN WAVES ON FORMATION OF DEFECT MODES IN ONE-DIMENSIONAL MAGNONIC CRYSTAL WITH DEFECT

E. S. Pavlov[1], *S. L. Vysotsky*[1,2], *A. V. Kozhevnikov*[1], *G. M. Dudko*[1], *Yu. A. Filimonov*[1,2]

[1]V. A. Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS, Saratov Branch
Zelenaya str., 38, 410019 Saratov, Russia
[2]National Research Saratov State University
Astrakhanskaya str., 83, 410012 Saratov, Russia
E-mail: gekapavlov@gmail.com, vysotsl@gmail.com, kzhavl@gmail.com, dugal_2010@hotmail.com, yuri.a.filimonov@gmail.com

Propagation of nonlinear magnetostatic surface waves through the one-dimensional magnonic crystal based on yttrium-iron garnet film with the defect of periodic array was experimentally studied.

Interest in the study of the magnonic crystals with defects is caused by the possibility of exciting of defect modes inside the forbidden gaps of MSSW spectrum that can be used to enhance the non-linear effects and signals control in the microwave range.

The studied structure was developed by etching of the periodic array of grooves with the defect in the form of increasing of the one separation width between two grooves up to the period of the surface structure. Magnetostatic surface waves were excited in the structure. Frequency dependencies of transmission and reflection coefficients were studied for different levels of the pump signal using a microwave network analyzer.

It was found that defect mode fade out as a result of three-magnon process. The threshold power for this process is less than the same parameter for Bragg resonance as a result of effect of local increasing of spin wave field as well as because of formation of non-equilibrium region of spin wave propagation that is localized near the defect. The shift of defect mode frequency and Bragg forbidden gap toward long wavelength limit of MSSW spectrum was found in the condition of four-magnon process at high pumping level as a result of change of MSSW dispersion at large angles of magnetization precession.

Keywords: Defect modes, magnonic crystal, parametric instability.

DOI: 10.18500/0869-6632-2017-25-2-74-88

Paper reference: Pavlov E.S., Vysotsky S.L., Kozhevnikov A.V., Dudko G.M., Filimonov Yu.A. Influence of parametrically instability of magnetostatic surface spin waves on formatted of defect modes in one-dimensional magnonic crystal with defect. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*. 2017. Vol. 25. Issue 2. P. 74–88.

Введение

Исследование эффектов при резонансном рассеянии спиновых волн (СВ) в периодических магнитных микроструктурах – магнонных кристаллах (МК) представляет фундаментальный и прикладной интерес как с точки зрения изучения волновой динамики, так и для расширения возможностей управления спектром СВ и создания устройств СВЧ диапазона [1].

Одним из важнейших параметров, характеризующих спектр СВ в МК, является ширина полос непропускания (магнонных запрещённых зон) $\Delta\omega^{B}$, формирующихся на частотах брэгговских резонансов. Большинство исследований направлено на изучении зависимости $\Delta\omega^{B}$ от параметров решётки МК: контраста намагниченности, плотности упаковки, симметрии МК, величины модуляции размеров волновода СВ [2–4], а также перестройки полосы $\Delta\omega^{B}$ с помощью изменения величины и направления магнитного поля. Несовершенства структуры (дефекты) периодической

© *Е.С. Павлов, С.Л. Высоцкий, А.В. Кожевников, Г.М. Дудко, Ю.А. Филимонов*

решётки приводят к нарушению трансляционной симметрии МК и влияют на параметры $\Delta\omega^{\text{B}}$. Такие дефекты могут быть связаны как с технологией создания МК, так и созданы специально с целью модификации спектра магнонов в МК.

До сих пор при изучении особенностей формирования спектра СВ в МК с дефектами уделялось внимание, в основном, линейному режиму распространения СВ. Исследовалось влияние на формирование $\Delta\omega^{\text{B}}$ случайных отклонений периодичности [5, 6], модуляции нескольких параметров периодической решётки [7, 8], неоднородности распределения диссипативных параметров [9], качества, профиля и конечных толщин на границе между участками с различными параметрами [10, 11]. Как было показано в работах [5, 7–9], локальное изменение толщины одного из слоёв одномерного МК приводит к появлению в запрещённых зонах $\Delta\omega^{\text{B}}$ дискретных уровней возбуждений на частотах, соответствующих резонансам стоячих СВ по ширине дефектного слоя. Наличие одного дефекта в более общем случае, когда меняются и пространственные и магнитные параметры, может приводить к появлению одного или нескольких типов дефектных мод [7, 8] в запрещённой зоне. В экспериментах дефектные моды наблюдались для одно- (1D) и двумерных (2D) МК со структурными дефектами [1, 12, 13] в виде пиков пропускания внутри полос $\Delta\omega^{\text{B}}$.

Целью данной работы является экспериментальное исследование влияния параметрических процессов на формирование дефектных мод при распространении нелинейных поверхностных магнитостатических волн (ПМСВ) в 1D МК со структурным дефектом. Рассмотрено влияние трех- (3М) и четырехмагнонных (4М) процессов распада СВ, для которых, соответственно, выполняются следующие законы сохранения:

$$f_{k_{\text{p}}} = f_{k_1} + f_{k_2}, \quad \vec{k}_{\text{p}} = \vec{k_1} + \vec{k}_2, \tag{1}$$

$$2f_{k_{\text{p}}} = f_{k_1} + f_{k_2}, \quad 2\vec{k}_{\text{p}} = \vec{k_1} + \vec{k}_2, \tag{2}$$

где $f_{k_{\text{p}}}$ и $\vec{k}_{\text{p}}$ – частота и волновой вектор волны накачки, $f_{k_{1,2}}$ и $\vec{k}_{1,2}$ – аналогичные величины для параметрических СВ. При этом, процессы (1) для ПМСВ с волновым числом k_{p} разрешены и доминируют для частот $f_{k_{\text{p}}} \geq 2f_H$, где $f_H = \gamma H_0$ – частота «дна» спектра СВ [14], а $\gamma = 2.8$ МГц/Э – гиромагнитное отношение и H_0 – величина магнитного поля. В случае изотропных пленок процессы (1) разрешены во всей полосе частот существования ПМСВ для величин магнитного поля H_0

$$H_0 < \frac{4}{3}\pi M_0, \tag{3}$$

где $4\pi M_0$ – намагниченность насыщения. При значениях поля

$$H_0 > 2\pi M_0 \tag{4}$$

разрешены только 4М процессы (2). При мощности ПМСВ $P_{\text{in}} > P^{\text{th}}$, где P^{th} – порог параметрической неустойчивости по отношению к процессам (1) или (2), закон дисперсии и затухание волны накачки могут сильно меняться за счёт возбуждения неравновесных магнонов в коротковолновых участках спектра обменных СВ.

Отметим, что влияние параметрических процессов на формирование запрещённых зон в спектре спиновых волн в 1D МК ранее экспериментально исследовалось в [15–17]. Было показано [17], что развитие 3М процессов приводит к разрушению полос $\Delta\omega^{\text{B}}$ в спектре ПМСВ. В работе [15] было показано, что в условиях

© Е.С. Павлов, С.Л. Высоцкий, А.В. Кожевников, Г.М. Дудко, Ю.А. Филимонов

4М распадов рост мощности приводил к сдвигу запрещенных зон $\Delta\omega^{\text{B}}$ в спектре ПМСВ в область низких частот.

В отличие от работ [15–17], в данной статье изучено влияние параметрических процессов (1), (2) на формирование дефектных мод. При этом было уделено внимание сравнению величин порогов параметрической неустойчивости на частоте возбуждения дефектной моды и других частот из спектра ПМСВ в 1D МК со структурным дефектом.

1. Исследуемая структура и методика эксперимента

Эксперименты выполнялись с помощью макета линии задержки (ЛЗ) на ПМСВ, схематически показанного на рис. 1, *а*. Макет состоял из входного и выходного микрополосковых преобразователей и 1D МК с дефектом на основе пленки ЖИГ толщиной $d \approx 14.7$ мкм, шириной $w \approx 4$ мм, длиной $b \approx 7$ мм, с линией ферромагнитного резонанса (ФМР) $2\Delta H \approx 0.6$ Э, намагниченностью насыщения $4\pi M_0 \approx 1750$ Гс. На участке поверхности пленки ЖИГ с помощью химического травления был сформирован 1D МК в виде периодической решетки канавок глубиной $\delta d \approx 1.8$ мкм, шириной $w_g \approx 80$ мкм и периодом $\Lambda \approx 150$ мкм (рис. 1, *б, в*). Из-за анизотропии травления профиль канавки имел трапециевидную форму (см. рис. 1, *в*). Центральная часть периодической решетки 1D МК содержала дефект в виде микрополоски шириной $L_d \approx \Lambda \approx 150$ мкм (см. рис. 1, *б*).

Микрополосковые преобразователи были изготовлены на поверхности платы из поликора, имели ширину $w \approx 30$ мкм и были разнесены на расстояние $S \approx 5.5$ мм. Магнонный кристалл размещался на преобразователях таким образом, чтобы дефект был параллелен преобразователям и находился примерно посередине между ними (см. рис. 1, *а*).

Макет ЛЗ помещался в зазор между полюсами электромагнита в магнитное поле H_0, направленное вдоль преобразователей (см. рис. 1, *а*), что отвечало геометрии возбуждения ПМСВ с законом дисперсии [14]

$$f^2(k) - f_0^2 - \frac{f_m^2(1 - e^{-2kd})}{4} = 0, \quad (5)$$

где k – волновое число ПМСВ, $f_0 = \sqrt{f_H(f_H + f_m)}$, $f_m = \gamma 4\pi M_0$. Величина поля H_0 могла меняться в диапазоне $H_0 \approx 0$–7 кЭ.

Макет ЛЗ подключался в измерительный СВЧ тракт векторного анализатора цепей (VNA) Agilent ENA5071C-480 через последовательно подключенные малошумящий СВЧ усилитель Agilent и направленный ответвитель. С помощью VNA снимались частотные

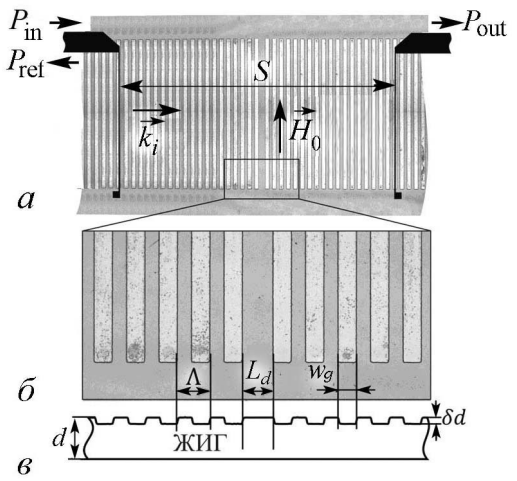


Рис. 1. *а* – схема эксперимента по возбуждению ПМСВ в 1D МК с дефектом; *б* – микрофотография поверхности и *в* – профиль участка периодической структуры 1D МК, содержащей дефект в форме гребня шириной $L_d \approx \Lambda \approx 150$ мкм

зависимости модулей коэффициентов отражения $R(f) = 10\ \lg(P_{\rm ref}(f)/P_{\rm in})$ и передачи $T(f) = 10\ \lg(P_{\rm out}(f)/P_{\rm in})$, где $P_{\rm in}$, $P_{\rm ref}$, $P_{\rm out}$ – величины падающей, отраженной и прошедшей мощностей, соответственно (см. рис. 1, *а*). Фаза коэффициента прохождения $\varphi_{\rm T}(f)$ использовалась для получения экспериментальных значений волновых чисел $k(f) \approx \pi\varphi_{\rm T}(f)/(180S)$ [18]. Уровень входной мощности $P_{\rm in}$ мог изменяться в пределах от -30 дБм до $+18$ дБм, где верхнее значение было ограничено динамическим диапазоном усилителя.

2. Влияние трехмагнонных процессов распада

В экспериментах по исследованию влияния 3М процессов величина поля подмагничивания бралась примерно равной $H_0 \approx 210$ Э, что удовлетворяло условию (3) и законы сохранения (1) выполнялись во всей полосе частот возбуждения ПМСВ.

На рис. 2, *а, б* показаны характеристики $T(f)$ и $R(f)$ в исследуемом макете в зависимости от уровня сигнала накачки $P_{\rm in}$ во всей полосе частот возбуждения ПМСВ. На рис. 2, *в, г* приведены более подробно участки характеристик в окрестности полосы непропускания B1. На рис. 3 показаны зависимости характеристики $R(P_{\rm in})$, снятые для трёх частот из спектра ПМСВ: $f_{\rm p1} \approx 2315$ МГц, $f_{\rm DM} \approx 2359$ МГц и $f_{\rm 1B} \approx 2370$ МГц, которые показаны на рис. 2, *г* кружками.

Следует отметить, что для дефектной моды характерно усиление поля волны в области дефекта [19–21]. Поэтому ожидалось, что на частоте $f_{\rm DM}$ величина пороговой мощности будет ниже, чем на частотах $f_{\rm B1}$ и $f_{\rm p1}$. Действительно, как можно видеть из рис. 3, между величинами пороговых мощностей для выбранных частот выполняется соотношение $P^{\rm th}_{\rm DM} < P^{\rm th}_{\rm B1} < P^{\rm th}_{\rm p1}$. При этом пороговая мощность на частоте $f_{\rm DM}$ составляет величину $P^{\rm th}_{\rm DM} \approx -25.7$ дБм, что на 3 дБ и 5 дБ меньше чем на частотах $f_{\rm B1}$ и $f_{\rm p1}$, соответственно.

Для анализа влияния мощности ПМСВ на зависимости $T(f)$ и $R(f)$ удобно воспользоваться параметром $C = 10\lg(P_{\rm in}/P^{\rm th}_{\rm DM})$, характеризующим надкритичность накачки [22–24, 16, 17]. В линейном режиме распространения ПМСВ (см. рис. 2, *а, б*, кривая *1*) при $C < 0$ дБ на участках спектра B1 и B2 на частотах $f_{\rm B1} \approx 2361$ МГц и $f_{\rm B2} \approx 2653$ МГц наблюдаются запрещённые зоны $\Delta f_{\rm B1,2}$, которые в спектре коэффициента передачи $T(f)$ проявляются как узкие полосы непропускания сигнала одновременно с ростом величины. Значения волновых чисел $k_{\rm B1} \approx 209$ см$^{-1}$ и $k_{\rm B2} \approx 410$ см$^{-1}$, отвечающих центральным частотам запрещённых зон $f_{\rm B1,2}$ и рассчитанных с помощью соотношения (5), находятся в согласии с условием возникновения брэгговского резонанса [25]

$$k_{{\rm B}n} = \frac{n\pi}{\Lambda}. \tag{6}$$

Из рис. 2, *в, г* видно, что на центральной частоте $f_{\rm DM} \approx 2359$ МГц в пределах полосы $\Delta f_{\rm DM} \approx 10$ МГц, лежащей внутри полосы $\Delta f_{\rm B1} \approx 55$ МГц брэгговского резонанса B1, возбуждается дефектная мода [12]. На зависимости $T(f)$ ей соответствует пик пропускания сигнала амплитудой $\Delta T_{\rm DM} \approx 15$ дБ, а на зависимости $R(f)$ – участок уменьшения отраженной мощности $\Delta R_{\rm DM} \approx 6$ дБ.

Как видно из рис. 2, *в* при надкритичности $C \approx 9$–26 дБ, величина $\Delta T_{\rm DM}$ существенно уменьшается. При $C \geq 26$ дБ в результате роста нелинейного затухания [23, 24] 3М процессы приводят к понижению величины $\Delta T_{\rm DM}$ до уровня

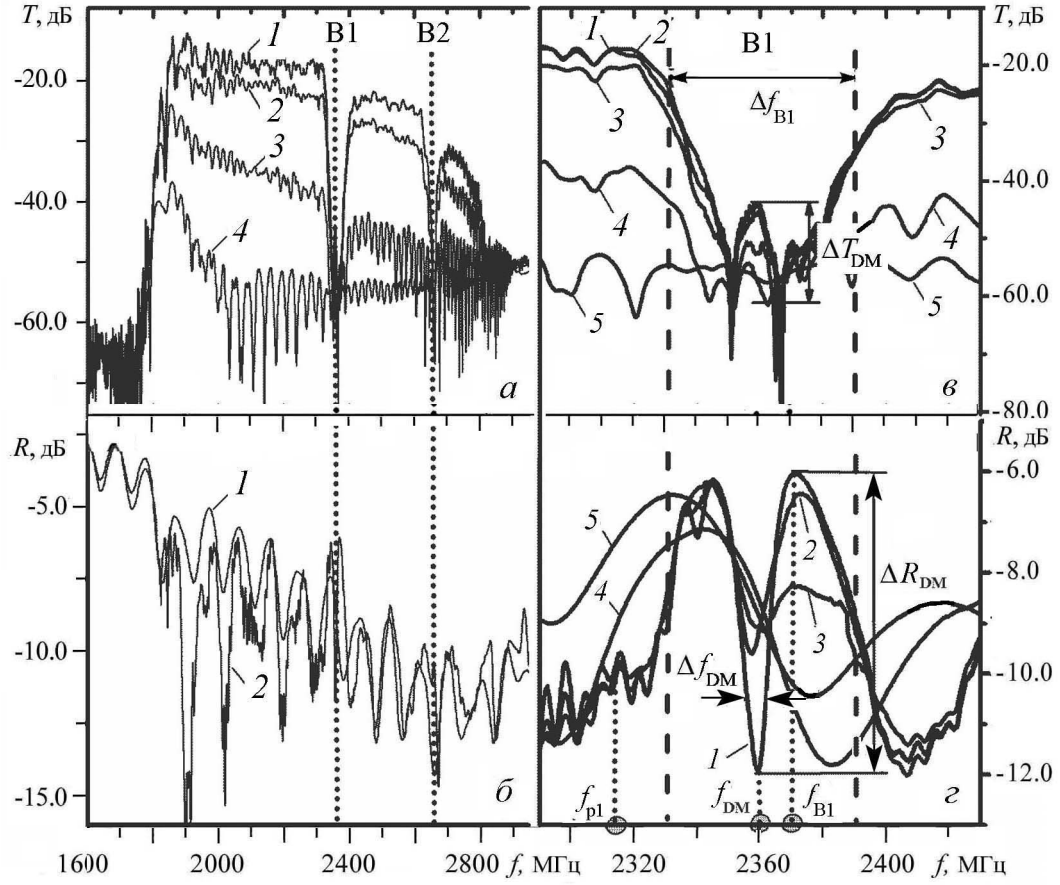


Рис. 2. Зависимости коэффициентов $T(f)$ (*а*) и $R(f)$ (*б*) ПМСВ в 1D магнонном кристалле с дефектом, шириной $L_d \approx 150$ мкм, при уровнях надкритичности C: *1* – (−4), *2* – 6, *3* – 9, *4* – 21, *5* – 36. Фрагменты кривых $T(f)$ (*в*) и $R(f)$ (*г*) в окрестности полосы B1 в условиях 4M процессов распада. Величина поля подмагничивания $H_0 \approx 210$ Э

$\Delta T_{\rm DM} \approx 0$ дБ, которому соответствует разрушение как дефектной моды, так и запрещённой зоны B1, аналогично случаю, описанному в [16, 17].

Изменение зависимости $\Delta R_{\rm DM}$ с ростом C показано на рис. 2, *г*. При величине $C \leq -4$ дБ, отвечающей линейному распространению ПМСВ, величина $\Delta R_{\rm DM} \approx 6$ дБ. При $C \approx 6$ дБ изменение $\Delta R_{\rm DM} \approx 3.7$ дБ, а при $C \approx 9$ дБ не превышает $\Delta R_{\rm DM} \approx 0.7$ дБ. При надкритичности $C > 11$ дБ величина $\Delta R_{\rm DM} \approx 0$, что соответствует исчезновению резонанса дефектной моды в отраженной мощности.

Отметим, что из сравнения величин $P^{\rm th}_{\rm DM}$ и $P^{\rm th}_{\rm p1}$, приведенных на рис. 3,

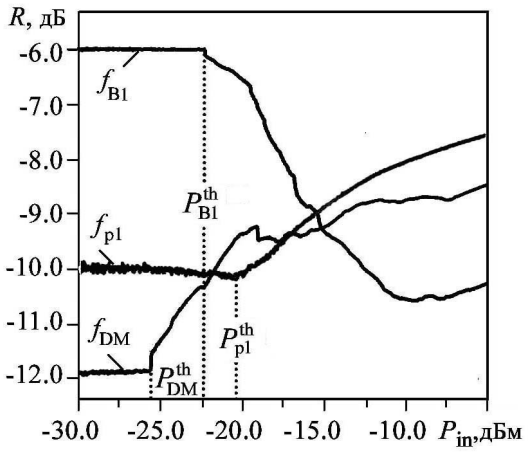


Рис. 3. Характеристики снятые для частот $f_{\rm P}$, МГц: *1* – 2359, *2* – 2370, *3* – 2315. Величина поля подмагничивания $H_0 \approx 210$ Э

можно показать, что на частоте $f_{\rm DM}$ действительно имеет место эффект усиления амплитуды поля волны. Для этого мощность ПМСВ $P_{\rm sw}$ свяжем с амплитудой СВЧ намагниченности m спиновой волны с помощью выражения [23]

$$P_{\rm sw} \approx v_{\rm g} d w m^2, \tag{7}$$

где $v_{\rm g}$ – групповая скорость определяется из (5), w – ширина плёнки, а величина m^2 характеризует плотность энергии волны в единице объема. Тогда отношение плотностей энергии волны на частотах $f_{\rm DM}$ и $f_{\rm p1}$ при уровнях мощности $P_{\rm DM}^{\rm th} \approx 2.7$ мкВт, $P_{\rm p1}^{\rm th} \approx 9$ мкВт, отвечающих порогам развития 3М распадов на рис. 3, можно представить в виде

$$\frac{m_{\rm DM}^2}{m_{\rm p1}^2} = \frac{P_{\rm DM}^{\rm th} f_{\rm DM}}{P_{\rm p1}^{\rm th} f_{\rm p1}} e^{2d\Delta K}, \tag{8}$$

где $\Delta K = k_{\rm DM} - k_{\rm p1}$. Если предположить, что параметр диссипации СВ ΔH_k на дефектном участке и в остальной части МК одинаков и равен ΔH исходной пленки ЖИГ, и учесть значения волновых чисел $k_{\rm DM} \approx 210$ см$^{-1}$ и $k_{\rm p1} \approx 180$ см$^{-1}$ ($\Delta k \approx 30$ см$^{-1}$) на частотах $f_{\rm DM}$ и $f_{\rm p1}$ ПМСВ, соответственно, то из (8) получим отношение амплитуд СВ $m_{\rm DM}/m_{\rm p1} \approx 1.7$. Последнее говорит об эффекте усиления поля волны в области дефекта.

3. Влияние четырехмагнонных процессов распада

Для исследования влияния 4М процессов (2) величина магнитного поля H_0 бралась равной $H_0 \approx 905$ Э в соответствии с условием (4). На рис. 4 представлены кривые $T(f)$ и $R(f)$ в зависимости от уровня сигнала накачки $P_{\rm in}$ в условиях 4М процессов распада. На рис. 4, *а, б* показаны характеристики $T(f)$ и $R(f)$, снятые в линейном режиме распространения во всей полосе частот возбуждения ПМСВ. На рис. 4, *в, г* показаны участки исследуемых характеристик в окрестности полосы непропускания В1, в пределах которой наблюдается формирование дефектной моды. На кривых $T(f)$ и $R(f)$ можно видеть возбуждение дефектной моды на частоте $f_{\rm DM} \approx 4636$ МГц с шириной $\Delta f_{\rm DM} \approx 10$ МГц в полосе В1 шириной $\Delta f_{\rm B1} \approx 30$ МГц.

Для определения порога развития 4М процессов воспользуемся, следуя [24], зависимостью относительного сдвига частоты дефектной моды $\Delta f_{\rm DM}^{\rm T}(P_{\rm in})$ на характеристике $T(f)$ и $\Delta f_{\rm DM}^{\rm R}(P_{\rm in})$ на характеристике $R(f)$, соответственно (рис. 5, *а*). Как видно из рисунка сдвиг частоты дефектной моды наблюдается при уровне мощности $P_{\rm in} \geq P_{\rm 4M}^{\rm th} \approx -0.4$ дБм, отвечающему порогу развития 4М процессов. Отметим, что определенное таким образом значение $P_{\rm 4M}^{\rm th}$ может быть завышено на несколько децибелл [24]. Далее будем использовать параметр надкритичности $C = 10\lg(P_{\rm in}/P_{\rm 4M}^{\rm th})$.

Как видно из рис. 4, *в, г* при величине надкритичности $C > 5$ дБ наблюдается нелинейный сдвиг частоты дефектной моды $\Delta f_{\rm DM}^{\rm T}$, $\Delta f_{\rm DM}^{\rm R}$ и полосы брэгговского резонанса $\Delta f_{\rm B1}$ в сторону меньших частот. На рис. 5, *а* приведена зависимость величин $\Delta f_{\rm DM}^{\rm T}$ и $\Delta f_{\rm DM}^{\rm R}$ от уровня входной мощности $P_{\rm in}$ (или надкритичности накачки C). Видно, что при значениях надкритичности в диапазоне $C \approx 5$–18 дБ наблюдается значительная разница в значениях $\Delta f_{\rm DM}^{\rm T}(P_{\rm in})$ (кривая *1*) и $\Delta f_{\rm DM}^{\rm R}(P_{\rm in})$ (кривая *2*), достигающая величин порядка 5–20 МГц.

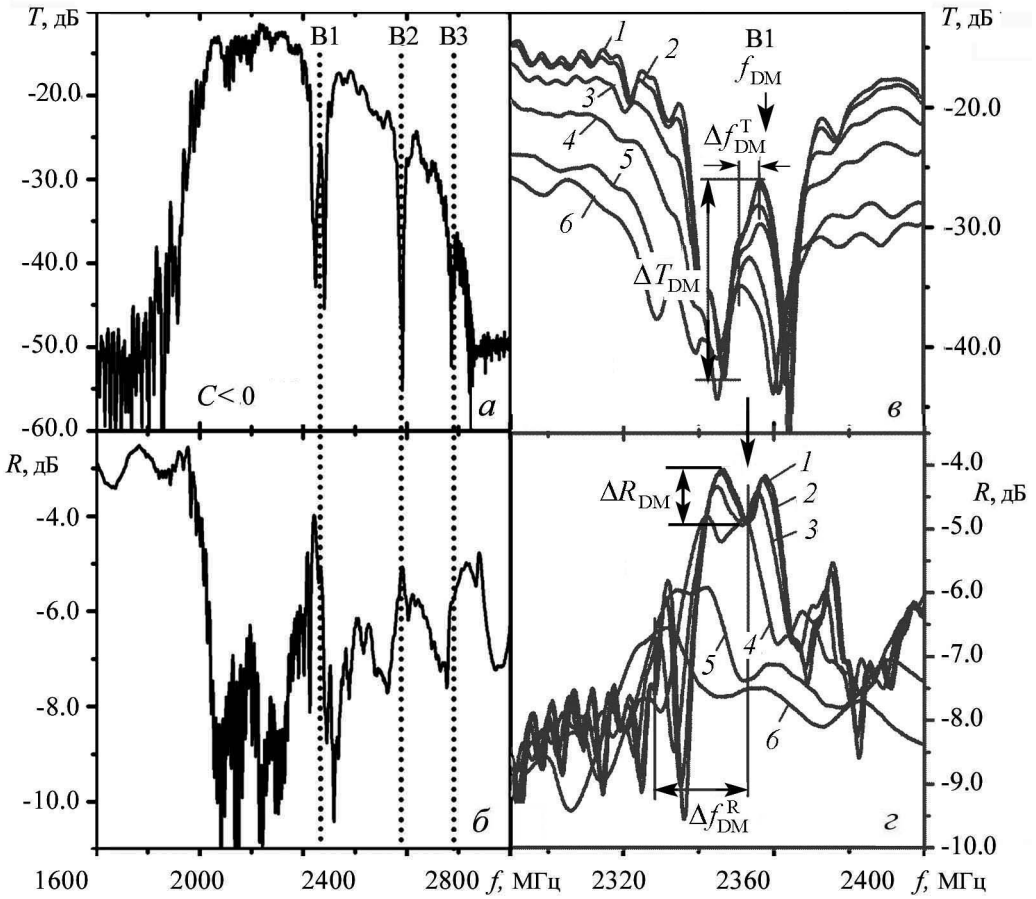


Рис. 4. Зависимости коэффициентов $T(f)$ (*а*) и $R(f)$ (*б*) ПМСВ в 1D магнонном кристалле с дефектом, шириной $L \approx 150$ мкм для уровней надкритичности C, дБ: *1* – (−5), *2* – 0, *3* – 5, *4* –10, *5* – 15, *6* – 18. Фрагменты (*в*) и (*г*) кривых $T(f)$ (*а*) и $R(f)$ (*б*) в окрестности полосы B1 в условиях 4M процессов распада. Величина поля подмагничивания $H_0 \approx 905$ Э

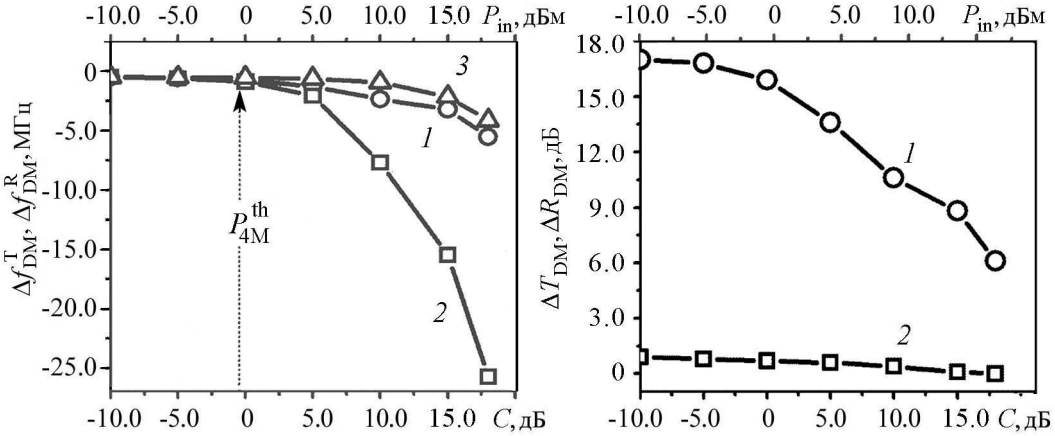


Рис. 5. *а* – зависимости нелинейного сдвига частоты Δf дефектной моды $f_{DM} \approx 4636$ МГц от входной мощности, полученные для характеристик $\Delta f_{DM}^{T}(P_{in})$ (кривая *1*) и $\Delta f_{DM}^{R}(P_{in})$ (кривая *2*), расчет δf_P (кривая *3*). *б* – зависимости нелинейного сдвига величин ΔT_{DM} (кривая *1*) и ΔR_{DM} (кривая *2*). Величина поля подмагничивания $H_0 \approx 905$ Э

Снижение частот брэгговских резонансов и дефектной моды с ростом надкритичности на рис. 4, *в, г* и отрицательный сдвиг частот $\Delta f^{\mathrm{T}}_{\mathrm{DM}}(P_{\mathrm{in}})$ и $\Delta f^{\mathrm{R}}_{\mathrm{DM}}(P_{\mathrm{in}})$ объясняется эффектом уменьшения эффективной длины продольной z-компоненты вектора намагниченности среды $M_0^2 = M_z^2 + |m|^2$ [14], где

$$M_z \approx M_0 - \frac{|m|^2}{2M_0} = M_0(1 - |\psi|^2) \tag{9}$$

с ростом угла прецессии намагниченности $\psi = |m|/(\sqrt{2}M_0)$. В этом случае на частоте накачки за счет нелинейности дисперсии возникает сдвиг спектра ПМСВ δf_{p} [14, 26–29]

$$\delta f_{\mathrm{p}} = -\frac{\omega_H \omega_M |m|^2}{8\pi\omega_0 M_0^2}. \tag{10}$$

Значение m можно рассчитать с помощью (7), где необходимо использовать значение мощности ПМСВ P_{sw} в пленке. В свою очередь, значение P_{sw} можно оценить с помощью соотношения [22–24]

$$P_{\mathrm{sw}} \approx P_{\mathrm{ref}}(H_1) - P_{\mathrm{ref}}(H_0), \tag{11}$$

где $P_{\mathrm{ref}}(H_0)$ и $P_{\mathrm{ref}}(H_1)$ – величины отраженной мощности, снятые при поле H_0, отвечающего возбуждению ПМСВ, и при поле $H_1 > f_{\mathrm{p}}/\gamma$, когда частота накачки лежит ниже «дна» спектра спиновых волн. Выражение (11) можно представить в виде

$$P_{\mathrm{sw}} \approx P_{\mathrm{in}} \left[10^{\frac{R(H_1)}{10}} - 10^{\frac{R(H_0)}{10}}\right], \tag{12}$$

где $R(H_i)$ – экспериментальные значения коэффициента отражения, измеренные при заданном уровне падающей мощности P_{in}.

На рис. 5, *а* показана рассчитанная с помощью (10) зависимость частотного сдвига спектра СВ δf_{p} (кривая *3*) от величины входной мощности. Можно видеть, что имеется качественное согласие результатов расчета и экспериментальной зависимости $\Delta f^{\mathrm{T}}_{\mathrm{DM}}(P_{\mathrm{in}})$ (кривая *1*).

На рис. 5, *б* показаны зависимости от уровня надкритичности C величин амплитуд резонансных особенностей на частоте дефектной моды в прошедшем (ΔT_{DM}) и отраженном (ΔR_{DM}) сигналах (см. рис. 4, *в, г*). Можно видеть, что при $C > 0$ дБ величина ΔT_{DM} начинает заметно снижаться и при уровне $C \approx 18$ дБ она уменьшается почти в 3 раза относительно своего значения в линейном режиме. Одновременно с этим, при указанном уровне C величина ΔR_{DM} становится равной $\Delta R_{\mathrm{DM}} \approx 0$ дБ, что означает исчезновение сигнала резонанса дефектной моды в отраженном сигнале.

Различие в значениях величин сдвига резонансных частот в спектре отраженного $\Delta f^{\mathrm{R}}_{\mathrm{DM}}(P_{\mathrm{in}})$ и прошедшего $\Delta f^{\mathrm{T}}_{\mathrm{DM}}(P_{\mathrm{in}})$ сигналов и поведение амплитуд резонансных пиков ΔR_{DM} и ΔT_{DM} следует связать с затуханием ПМСВ при распространении вдоль структуры. По этой причине плотность энергии m^2 волны, определяющая величину сдвига частот δf_{p} в формуле (10), на выходной антенне оказывается в рассматриваемом случае на $\Delta T = 8.86k''L \approx 18$ дБ меньше, чем на входной. При этом вызванные развитием параметрической неустойчивости вклады в дисперсию $\Delta k'$ и пространственный декремент $\Delta k''$ ПМСВ определяются не только уровнем

надкритичности C, но также расстоянием L, которое пробежала волна. В случае 3М процессов нелинейные добавки при надкритичностях $C > 0$ дБ могут составить $\Delta k' \sim \Delta k'' \approx$ 30–50 см$^{-1}$, тогда как в случае 4М распадов имеем $\Delta k' \sim \Delta k'' \approx$ $\approx$ 2–4 см$^{-1}$ [23]. С другой стороны, величина изменения дисперсии на частоте дефектной моды составляет $\Delta k_{\mathrm{DM}} \approx 5$ см$^{-1}$ [12]. По этой причине влияние 3М и 4М параметрических процессов на формирование дефектной моды при одинаковых уровнях надкритичности накачки проявляется по разному: при $C \approx 15$ дБ в условиях 3М распадов дефектная мода полностью исчезает, а в случае 4М процессов ещё наблюдаема на характеристике ΔT_{DM}.

Заключение

В работе исследовано:

- влияние трех- и четырехмагнонных процессов распада поверхностных магнитостатических спиновых волн на формирование дефектных мод в одномерном магнонном критсталле со структурным дефектом;
- показано, что трехмагнонный распад поверхностных магнитостатических спиновых волн приводит к разрушению дефектных мод; пороговые мощности развития трехмагнонных процессов на частотах дефектных мод примерно в два раза меньше пороговых мощностей разрушения брэгговского резонанса; такая особенность объясняется эффектом локального усиления поля спиновой волны в области дефекта и формировании в нем неравновесного участка распространения спиновых волн;
- в условиях развития четырехмагнонных процессов при больших уровнях надкритичности накачки обнаружен сдвиг дефектной моды вместе с полосой брэгговского резонанса в сторону длинноволновой границы, что объясняется сдвигом дисперсии волны накачки при больших углах прецессии намагниченности.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 16-02-01073_а, № 17-07-01452 А).

Библиографический список

1. *Никитов С.А., Калябин Д.В., Лисенков И.В., Славин А.Н., Барабаненков Ю.Н., Осокин С.А., Садовников А.В., Бегинин Е.Н., Морозова М.А., Шараевский Ю.П., Филимонов Ю.А., Хивинцев Ю.В., Высоцкий С.Л., Сахаров В.К., Павлов Е.С.* Магноника – новое направление спинтроники и спин-волновой электроники // УФН. 2015. Т. 185, № 10. С. 1099–1128.
2. *Chumak A.V., Serga A.A., Hillebrands B., Kostylev M.P.* Scattering of backward spin waves in a one-dimensional magnonic crystal // Appl. Phys. Lett. 2008. Vol. 93. P. 022508.
3. *Lee K.S., Han D.S., Lim S.K.* Physical origin and generic control of magnonic band gaps of dipole-exchange spin waves in width-modulated nanostrip waveguides // Phys. Rev. Lett. 2009. Vol. 102. P. 127202.
4. *Гуляев Ю.В., Никитов С.А., Плесский В.П.* Распространение магнитостатических волн в нормально намагниченной пластине феррита с периодически неровными поверхностями // ФТТ. 1980. Т. 22. С. 2831.

© *Е.С. Павлов, С.Л. Высоцкий, А.В. Кожевников, Г.М. Дудко, Ю.А. Филимонов*

5. *Nikitov S.A., Taihades Ph., Tsai C.S.* Spin waves in periodic magnetic structures – magnonic crystals // Journ. Magn. Magn. Mater. 2001. Vol. 0236. P. 320–330.
6. *Ignatchenko V.A., Mankov Y.I., Maradudin A.A.* Spectrum of waves in randomly modulated multilayers // Phys. Rev. B. 1999. Vol. 59. P. 42–45.
7. *Kruglyak V.V., Kuchko A.N.* Spectrum of spin waves propagating in a periodic magnetic structure // Physica B: Condensed Matter. 2003. Vol. 339, № 2–3. P. 130–133.
8. *Kuchko A.N., Sokolovskii M.L., Kruglyak V.V.* // The Physics of Metals and Metallography. 2006. Vol. 101, № 6. P. 513–518.
9. *Kruglyak V.V., Kuchko A.N.* Damping of spin waves in a real magnonic crystal // Journ. Magn. Magn. Mater. 2004. Vol. 272–276, No. 1. P.302–303.
10. *Tkachenko V.S., Kruglyak V.V, Kuchko A.N.* Spin waves in a magnonic crystal with sine-like interfaces // Journ. Mag. Mag. Mater. 2006. Vol. 307, No. 1. P. 48–52.
11. *Ignatchenko V.A., Mankov Y.I., Maradudin A.A.* Wave spectrum of multilayers with finite thicknesses of interfaces // Phys. Rev. B. 2000. Vol. 62, No. 3. P. 2181–2184.
12. *Filimonov Yu.A., Pavlov E.S., Vysotskii S.L., Nikitov S.A.* Magnetostatic surface wave propagation in a one-dimensional magnonic crystal with broken translational symmetry // Appl. Phys. Lett. 2012. Vol. 101. P. 242408.
13. *Павлов Е.С., Филимонов Ю.А.* Бистабильность спиновых волн в нелинейных брэгговских резонаторах на основе ферритовых магнонных кристаллов // Нелинейный мир. 2015. Т. 13, № 2. С. 35–36.
14. *Гуревич А.Г., Мелков Г.А.* Магнитные колебания и волны М.: Физматлит, 1994. 464 с.
15. *Ustinov A.B., Drozdovskii A.V., Kalinikos B.A.* Multifunctional nonlinear magnonic devices for microwave signal processing // Appl. Phys. Lett. 2010. Vol. 96. P. 142513.
16. *Высоцкий С.Л., Кожевников А.В., Филимонов Ю.А. и др.* Параметрическая неустойчивость поверхностных магнитостатических волн в двумерных магнонных кристаллах // Известия вузов. ПНД. 2007. Т. 15, № 3. С. 58–73.
17. *Высоцкий С.Л., Никитов С.А., Новицкий Н.Н., Павлов Е.С., Стогний А.И., Филимонов Ю.А.* Влияние параметрической неустойчивости первого порядка на формирование полос непропускания в спектре поверхностных магнитостатических волн в одномерном ферритовом магнонном кристалле // Изв. вузов ПНД. 2012. Т. 20, № 2. С. 3–11.
18. *Медведев В.В., Фетисов Ю.К.* Вопросы кибернетики. Устройства и системы. М.: МИРЭА, 1983. 171 с.
19. *Soljacic M., Joannopoulos J.D.* Enhancement of nonlinear effects using photonic crystals // Nature Mater. 2004. Vol. 3. P. 211–219.
20. *Khanikae A.B., Baryshev A.V., Fedyanin A.A., et al.* Anomalous Faraday effect of a system with extraordinary optical transmittance // Optics Express. 2007. Vol. 15. P. 6612.
21. *Kai Di, Vanessa Li Zhang, Meng Hau Kuok, Hock Siah Lim, Ser Choon Ng.* Band structure of magnonic crystals with defects: Brillouin spectroscopy and micromagnetic simulations // Phys. Rev. B. 2014. Vol. 90. P. 060405.
22. *Kozhevnikov A.V., Nikitov S.A., Filimonov Yu.A.* Attenuation of non-linear surface magnetostatic waves in ferrite films // J. de Physique IV. Colloque C1. 1997. Vol. 7. P. 401–402.

© *Е.С. Павлов, С.Л. Высоцкий, А.В. Кожевников, Г.М. Дудко, Ю.А. Филимонов*

23. *Казаков Г.Т., Кожевников А.В., Филимонов Ю.А.* Влияние параметрически возбуждённых спиновых волн на дисперсию и затухание поверхностных магнитостатических волн в ферритовых плёнках // ЖЭТФ. 1999. Т. 115, вып. 1. С. 1–15.
24. *Казаков Г.Т., Кожевников А.В., Филимонов Ю.А.* Четырехмагнонный распад поверхностных магнитостатических волн в пленках ЖИГ // ФТТ. 1997. Т. 39, № 2. С. 330–338.
25. *Гуляев Ю.В., Никитов С.А., Плесский В.П.* Отражение поверхностных магнитостатических волн от периодически неровного участка поверхности феррита // Радиотехника и электроника. 1981. Т. 23. С. 2282.
26. *Suhl H.* The theory of ferromagnetic resonance at high signal powers // J. Phys. Chem. Sol. 1957. Vol. 1, № 4. P. 209–227.
27. *Лукомский В.П.* Нелинейные магнитостатические волны в ферромагнитных пластинах // Укр. Физ. журн. 1978. Т. 23, № 1. С. 134–139.
28. *Вашковский А.В., Стальмахов В.С, Шараевский Ю.П.* Магнитостатические волны в электронике сверхвысоких частот. Саратов: Изд-во СГУ, 1993. 312 с.
29. *Tsankov M.A., Chen M., Patton C.E.* Magnetostatic wave dynamic magnetization response in yttrium iron garnet films // J. Appl. Phys. 1996. Vol. 79, № 3. P. 1595–1603.

References

1. Nikitov S.A. Kalyabin D.V., Lisenkov I.V., Slavin A.N., Barabanenkov Yu.N., Osokin S.A., Sadovnikov A.V., Beginin E.N., Morozova M.A., Sharaevsky Yu.P., Filimonov Yu.A., Khivintsev Yu.V., Vysotsky S.L., Sakharov V.K., Pavlov E.S. Magnonics: A new research area in spintronics and spin wave electronics. *Physics – Uspekhi*. 2015. Vol. 58, No. 10. P. 1002–1028.
2. Chumak A.V., Serga A.A., Hillebrands B., Kostylev M.P. Scattering of backward spin waves in a one-dimensional magnonic crystal. *Appl. Phys. Lett.* 2008. Vol. 93. P. 022508.
3. Lee K.S., Han D.S., Lim S.K. Physical origin and generic control of magnonic band gaps of dipole-exchange spin waves in width-modulated nanostrip waveguides. *Phys. Rev. Lett.* 2009. Vol. 102. P. 127202.
4. Gulyaev Yu.V., Nikitov S.A., Plesskii V.P. The propagation of magnetostatic waves in a normally magnetized ferrite plate with periodically uneven surfaces. *Sov. Phys. Solid State*. 1980. Vol. 22, No. 9. P.1651–1652.
5. Nikitov S.A., Taihades Ph., Tsai C.S. Spin waves in periodic magnetic structures – magnonic crystals. *Journ. Magn. Magn. Mater.* 2001. Vol. 0236. P. 320–330.
6. Ignatchenko V.A., Mankov Y.I., Maradudin A.A. Spectrum of waves in randomly modulated multilayers. *Phys. Rev. B.* 1999. Vol. 59. P. 42– 45.
7. Kruglyak V.V., Kuchko A.N. Spectrum of spin waves propagating in a periodic magnetic structure. *Physica B: Condensed Matter*. 2003. Vol. 339, No. 2–3. P. 130–133.
8. Kuchko A.N., Sokolovskii M. L., Kruglyak V.V. *The Physics of Metals and Metallography.* 2006. Vol. 101, No. 6. P. 513–518.
9. Kruglyak V.V., Kuchko A.N. Damping of spin waves in a real magnonic crystal. *Journ. Magn. Magn. Mater.* 2004. Vol. 272–276, No. 1. P. 302–303.

© *Е.С. Павлов, С.Л. Высоцкий, А.В. Кожевников, Г.М. Дудко, Ю.А. Филимонов*

10. Tkachenko V.S., Kruglyak V.V, Kuchko A.N. Spin waves in a magnonic crystal with sine-like interfaces. *Journ. Mag. Mag. Mater.* 2006. Vol. 307, No. 1. P. 48–52.
11. Ignatchenko V.A., Mankov Y.I., Maradudin A.A. Wave spectrum of multilayers with finite thicknesses of interfaces. *Phys. Rev. B.* 2000. Vol. 62, No. 3. P. 2181–2184.
12. Filimonov Yu.A., Pavlov E.S., Vysotskii S.L., Nikitov S.A. Magnetostatic surface wave propagation in a one-dimensional magnonic crystal with broken translational symmetry. *Appl. Phys. Lett*. 2012. Vol. 101. P. 242408.
13. Pavlov E.S., Filimonov Yu.A. Spin-wave bistability in a nonlinear Bragg resonators based on ferrite magnonic crystal. *Nelineinyi mir*. 2015. Vol. 13, No. 2. P. 35–36 (in Russian).
14. Gurevich A.G., Melkov G.A. Magnetization Oscillations and Waves. CRC Press, 1996. 456 p.
15. Ustinov A.B., Drozdovskii A.V., Kalinikos B.A. Multifunctional nonlinear magnonic devices for microwave signal processing. *Appl. Phys. Lett.* 2010. Vol. 96. P. 142513.
16. Vysotsky S.L., Kozhevnikov A.V., Kazakov G.T., Nikitov S.A., Filimonov Yu.A. Magnetostatic surface waves parametric instability in two-dimensional 2D magnonic crystals. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics.* 2007. Vol. 15, No. 3. P. 58–73 (in Russian).
17. Vysotsky S.L., Nikitov S.A., Novitsky N.N., Pavlov E.S., Stognij A.I., Filimonov Yu.A. Influence of first order parametric instability on formation of forbidden gaps in spectra of magnetostatic surface waves in one-dimensional ferrite magnonic crystal. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics.* 2012. Vol. 20, No. 2. P. 3–11 (in Russian).
18. Medvedev V.V., Fetisov Yu.K. Voprosy Kibernetiki: Ustroystva i Sistemy. M.: MIREA, 1983. P. 171 (in Russian).
19. Soljacic M., Joannopoulos J.D. Enhancement of nonlinear effects using photonic crystals. *Nature Mater*. 2004. Vol. 3. P. 211–219.
20. Khanikae A.B., Baryshev A.V., Fedyanin A.A., et al. Anomalous Faraday effect of a system with extraordinary optical transmittance. *Optics Express*. 2007. Vol. 15. P. 6612.
21. Kai Di, Vanessa Li Zhang, Meng Hau Kuok, Hock Siah Lim, Ser Choon Ng. Band structure of magnonic crystals with defects: Brillouin spectroscopy and micromagnetic simulations. *Phys. Rev. B.* 2014. Vol. 90. P. 060405.
22. Kozhevnikov A.V., Nikitov S.A., Filimonov Yu.A. Attenuation of non-linear surface magnetostatic waves in ferrite films. *J. de Physique IV. Colloque C1.* 1997. Vol. 7. P. 401–402.
23. Kazakov G.T., Kozhevnikov A.V., Filimonov Yu.A. The effect of parametrically excited spin waves on the dispersion and damping of magnetostatic surface waves in ferrite films. *Zh. Eksp. Teor. Fiz*. 1999. Vol. 115, No. 1. C. 1–15.
24. Kazakov G.T., Kozhevnikov A.V., Filimonov Yu.A. Four-magnon decay of magnetostatic surface waves in yttrium iron garnet films. *Physics of the Solid State.* 1997. Vol. 39, No. 2. P. 288–295.
25. Gulyaev Yu.V., Nikitov S.A., Plesskii V.P. Reflection of surface magnetostatic waves from the periodically corrugated part of the ferrite slab surface. *Sov. J. Telecom. Radioeng*. 1981. Vol. 26, No. 11. P. 2282–2291.

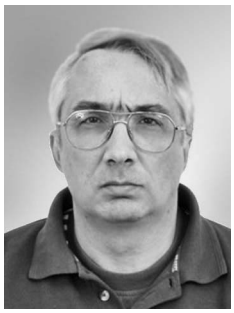
© *Е.С. Павлов, С.Л. Высоцкий, А.В. Кожевников, Г.М. Дудко, Ю.А. Филимонов*

26. Suhl H. The theory of ferromagnetic resonance at high signal powers. *J. Phys. Chem. Sol*. 1957. Vol. 1, No. 4. P. 209–227.
27. Lukomskiy V.P. Nelineynie magnitostaticheskie volny v ferromagnitnih plastinah. *Ukr. Fiz. Zhurn.* 1978. Vol. 23, No. 1. P. 134–139 (in Russian).
28. Vashkovsky A.V., Stalmachov V.S., Sharaevsky Yu.P. Magnitostaticheskie Volny v Electronike Sverhvysokih Chastot. Saratov: Izd-vo SGU, 1993. 312 p. (in Russian).
29. Tsankov M.A., Chen M., Patton C.E. Magnetostatic wave dynamic magnetization response in yttrium iron garnet films. *J. Appl. Phys.* 1996. Vol. 79, No. 3. P. 1595–1603.

Поступила в редакцию *1.12.2016*
После доработки *16.03.2017*

Павлов Евгений Сергеевич – родился в 1986 году. Окончил факультет нано- и биомедицинских технологий Саратовского государственного университета в (2008). Научный сотрудник Саратовского филиала Института радиотехники и электроники РАН. Область научных интересов – физика твердого тела, спиновые волны в магнитных пленках, нелинейные явления в ферритах. Автор 12 работ в реферируемых научных журналах.

Россия, 410019 Саратов, Зеленая, д. 38
Институт радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН, Саратовский филиал
E-mail: gekapavlov@gmail.com



Высоцкий Сергей Львович родился в 1955 году в Саратове. Окончил Саратовский политехнический институт (1977). С 1981 года работает в Саратовском филиале Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, в настоящее время - ведущим научным сотрудником лаборатории «Магнитоэлектроники СВЧ». Кандидат физико-математических наук (1994), тема диссертационной работы «Влияние анизотропии и межслойного обменного взаимодействия на распространение магнитостатических волн в слоистых ферритовых структурах». Область научных интересов: магнитоэлектроника СВЧ. Автор более 40 статей в российских и международных журналах.

Россия, 410019 Саратов, Зеленая, д. 38
Институт радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН, Саратовский филиал
Россия, 410012 Саратов, Астраханская, 83
Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
E-mail: vysotsl@gmail.com

Дудко Галина Михайловна родилась в 1961 году в Свердловске. Окончила физический факультет Саратовского университета им. Н.Г. Чернышевского (1983) по специальности «радиофизика и электроника». 2002 года. Защитила кандидатскую диссертацию (2002) на тему «Эффекты самовоздействия магнитостатических волн в ферромагнитных пленках». Область научных интересов: нелинейная динамика магнитостатических волн, численное моделирование процессов самомодуляции и самофокусировки магнитостатических волн, колебаний намагниченности и распространения спиновых волн в ферромагнитных нано- и микроструктурах. Автор более 20 статей в высокорейтинговых российских и международных журналах.

Россия, 410019 Саратов, Зеленая, д. 38
Институт радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН, Саратовский филиал
E-mail: dugal_2010@hotmail.com

© *Е.С. Павлов, С.Л. Высоцкий, А.В. Кожевников, Г.М. Дудко, Ю.А. Филимонов*

Филимонов Юрий Александрович родился в Куйбышев (1955). Окончил факультет физической и квантовой электроники МФТИ (1979). Доктор физико-математических наук (2008), профессор (2012). Директор Саратовского филиала ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Область научных интересов: магноника и спинтроника, магнитные материалы и структуры, электронная компонентная база. Имеет более 120 публикаций.

Россия, 410019 Саратов, Зеленая, д. 38
Институт радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН, Саратовский филиал
Россия, 410012 Саратов, Астраханская, 83
Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
E-mail: yuri.a.filimonov@gmail.com

Кожевников Александр Владимирович родился в 1962 году в Саратове. Окончил физический факультет Саратовского университета им. Н.Г. Чернышевского (1984) по специальности «полупроводники и диэлектрики». Кандидат физико-математических наук (2011), тема диссертационной работы «Влияние параметрических спиновых волн на дисперсию и затухание магнитостатических волн в пленках железоиттриевого граната». Область научных интересов: физика твердого тела, нелинейная динамика распределенных систем, спиновые волны в ферритовых планарных структурах.

Россия, 410019 Саратов, Зеленая, д. 38
Институт радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН, Саратовский филиал
E-mail: kzhavl@gmail.com

© *Е.С. Павлов, С.Л. Высоцкий, А.В. Кожевников, Г.М. Дудко, Ю.А. Филимонов*