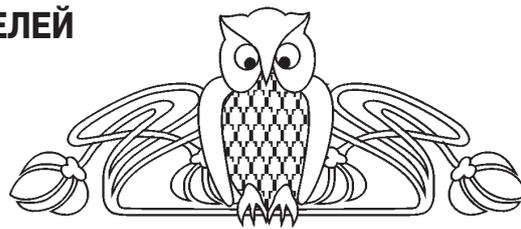




УДК 537.622.2:537.862

## РАСЧЕТ ФОКУСИРУЮЩИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ СПИНОВЫХ ВОЛН МЕТОДОМ МИКРОМАГНИТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Г. М. Дудко, А. В. Кожевников, В. К. Сахаров,  
А. В. Стальмахов, Ю. А. Филимонов, Ю. В. Хивинцев



Дудко Галина Михайловна, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории магнитоэлектроники СВЧ, Саратовский филиал Института радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН, dugal\_2010@hotmail.com

Кожевников Александр Владимирович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории магнитоэлектроники СВЧ, Саратовский филиал Института радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН, kzhavl@gmail.com

Сахаров Валентин Константинович, научный сотрудник лаборатории магнитоэлектроники СВЧ, Саратовский филиал Института радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН, valentin@sakharov.info

Стальмахов Андрей Всеволодович, доктор физико-математических наук, профессор, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, stalmahov@sgu.ru

Филимонов Юрий Александрович, доктор физико-математических наук, профессор, директор Саратовского филиала Института радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН; заведующий кафедрой технологии материалов на базе Саратовского филиала Института радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, yuri.a.filimonov@gmail.com

Хивинцев Юрий Владимирович, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории магнитоэлектроники СВЧ, Саратовский филиал Института радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН; доцент кафедры технологии материалов на базе Саратовского филиала Института радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, khivintsev@gmail.com

Объектом исследования данной работы являются спиновые волны (СВ) в магнитных пленках. В последнее десятилетие наблюдается всплеск интереса к СВ, который вызван перспективой создания спин-волновых устройств обработки информации субмикронных размеров и интеграции магнитных и спинтронных устройств. Следует добавить, что помимо традиционного применения спиновых волн для обработки СВЧ-сигналов широко обсуждается возможность изготовления логических устройств и голографической памяти на основе эффектов распространения и интерференции СВ. Целью этой работы является разработка нового метода для расчета фокусирующих преобразователей СВ, распространяющихся в тонкопленочных волноводах со значительно неравномерным распределением параметров. Метод

основан на использовании микромагнитного моделирования процесса распространения спиновых волн при их возбуждении точечным источником. Микромагнитное моделирование проводилось с использованием бесплатного программного обеспечения – «Object Oriented Micromagnetic Framework» (OOMMF), разработанного Национальным институтом стандартов и технологий США. Показана возможность расчета формы преобразователей, отвечающих оптимальной фокусировке спиновых волн, как для пленок с однородным распределением магнитных параметров, так и с неоднородным. В последнем случае численный подход является единственно возможным.

**Ключевые слова:** спиновые волны, волновые пучки, фокусирующие преобразователи, микромагнитное моделирование, неоднородные магнитные пленки.

DOI: 10.18500/1817-3020-2018-18-2-92-102

### Введение

Исследования в области разработки электронной элементной базы СВЧ информационных систем на основе магнитных колебаний и волн ведутся с 60-х годов прошлого века. Наблюдающийся на протяжении последнего десятилетия всплеск интереса к спиновым волнам (СВ) обусловлен перспективами использования в качестве носителей информации спиновых волн субмикронного и нанометрового масштаба, что открывает путь к созданию устройств на принципах магноники и существенной миниатюризации устройств на спиновых волнах. Кроме того, эффекты генерации спиновых волн спин-поляризованным током в ферромагнитных наноструктурах позволяют надеяться на интеграцию устройств магноники и спинтроники [1]. К этому следует добавить, что помимо традиционной области применения спиновых волн, связанной с обработкой информации на СВЧ, в последнее время широко обсуждается возможность создания логики и голографической памяти на эффектах распространения и интерференции спиновых волн [2, 3], а также нелинейных устройств различного типа, использующих спиновые волны [4, 5].

Важно отметить, что интерес к активным исследованиям спиновых волн субмикронного и нанометрового масштаба обусловлен успешным решением ряда задач, направленных на



изучение СВЧ свойств магнитных наноструктур. Во-первых, был достигнут значительный прогресс в технологии создания магнитных материалов и наноструктур с параметрами скорости релаксации спиновых волн на СВЧ, обеспечивающими длину пробега в десятки или даже сотни микрон [6, 7]. Во-вторых, были разработаны методы возбуждения спиновых волн с длиной волны от десятков микрон до сотен нанометров [8, 9], а также методы изучения пространственного распределения спиновых волн в микро- и наноструктурах, основанные на мандельштамм-бриллюэновской [10] и керровской [11] сканирующей спектроскопии. Наконец, появились численные методы микромагнитного моделирования [12, 13], которые позволяют изучать динамику спиновых волн в магнитных наноструктурах с неоднородным распределением параметров и при этом дают хорошее соответствие с результатами экспериментов.

В целом за последние годы был достигнут существенный прогресс в изучении свойств СВ в магнитных микро- и наноструктурах, характеризующихся существенно неоднородным основным состоянием, и выявлен целый ряд особенностей по сравнению со случаем дипольных магнито-статических волн (МСВ), распространяющихся в однородных пленочных волноводах. Однако вопросам формирования волновых пучков СВ в магнитных микроструктурах внимания практически не уделялось. Нам известно лишь несколько работ, где затрагивались вопросы формирования волновых фронтов от магнитных неоднородностей микронных размеров при возбуждении однородной СВЧ накачкой [14] или при рассеянии на них дипольных МСВ [15]. Между тем, ранее [16–19] на примере дипольных МСВ, распространяющихся в однородных пленочных волноводах, было показано, что возможность формировать волновые пучки и управлять их параметрами может существенно изменить подходы к построению устройств функциональной СВЧ электроники. Поэтому возникла необходимость в разработке основанного на методе микромагнитного моделирования подхода к расчету фокусирующих преобразователей СВ в тонкопленочных волноводах с существенно неоднородным распределением параметров.

### Результаты и их обсуждение

Отметим, что в случае, когда имеется аналитическое выражение для закона дисперсии СВ  $D(\omega, k, \varphi) = 0$ , задающее связь между частотой  $\omega$ , волновым числом  $k$  и углом  $\varphi$  между направле-

нием магнитного поля  $\vec{H}$  и волновым вектором  $\vec{k}$ , для расчета фокусирующих антенн можно использовать развитый ранее подход [16–19]. В этом случае решение обратной задачи по поиску формы фокусирующего преобразователя сводится к решению системы из трех уравнений, где помимо уравнения  $D=0$  используется уравнение для угла  $\theta$  между направлением групповой скорости СВ и полем  $\vec{H}$  (оно может быть получено из уравнения  $D(\omega, k, \varphi) = 0$ ) и условие постоянства набега фазы вдоль траектории  $L_i(\theta)$  ( $L_i \cdot k = \text{const}$ ), которая соединяет точку фокуса и  $i$ -й участок криволинейного преобразователя. Применимость данного подхода в большинстве случаев ограничивается случаем однородных пленочных волноводов и приближением дипольных волн. В случае волноводов с неоднородным распределением параметров микромагнитное моделирование является единственным способом расчета формы фокусирующего преобразователя. К этому следует добавить, что при переходе к магнитным микро- и наноструктурам основное состояние пленки из-за влияния полей размагничивания становится сильно неоднородным и рассчитать фокусирующие преобразователи в таких структурах также можно лишь с помощью численных методов.

В работе будет исследована применимость подхода микромагнитного моделирования к расчету фокусирующих антенн спиновых волн с помощью пакета «Object Oriented Micromagnetic Framework» OOMMF [10]. Мы покажем, что микромагнитное моделирование обратной задачи – возбуждения и распространения МСВ от точечного источника – позволяет при заданных частоте и поле подмагничивания легко определить линии равной фазы на любом расстоянии от излучателя. Эти линии будут задавать форму и размер фокусирующего излучателя для выбранного фокусного расстояния.

Прежде всего, рассмотрим результаты расчета фокусирующих преобразователей для СВ, распространяющихся в однородной, касательно намагниченной пленке железо-иттриевого гранта (ЖИГ). Будем рассматривать случаи поверхностной СВ (ПСВ), когда волна распространяется перпендикулярно направлению поля подмагничивания  $H$ , и обратной объемной СВ (ООСВ), когда волны бегут вдоль поля. Рассматривался случай пленки ЖИГ с параметрами: толщина  $d = 4$  мкм, намагниченность насыщения  $4\pi M = 1750$  Гс, гиромагнитное отношение  $\gamma = 2.8$  МГц/Э, скорость релаксации  $\alpha = 10^{-3}$ .



Пленка считалась изотропной и намагниченной касательно в поле  $H = 1$  кЭ. Размер элементарной ячейки при моделировании был  $10 \times 10 \times 4$  мкм<sup>3</sup>. Размеры точечного источника колебаний намагниченности составляли  $20 \times 20 \times 4$  мкм<sup>3</sup>. Шаг по времени при расчете волновой динамики задавался равным  $10^{-11}$  с.

Следует отметить, что размер элементарной ячейки ограничивает сверху диапазон волновых чисел, наблюдаемых при микромагнитном моделировании. Максимальное волновое число  $k_{\max}$  можно оценить исходя из того, что для наблюдения волнового процесса на длину волны должно приходиться как минимум две элементарных ячейки. При выбранных параметрах получаем  $k_{\max} = \pi \times 10^3$  см<sup>-1</sup>. Это соответствует рассмотрению при моделировании лишь дипольной части спектра СВ, характерной для эксперименталь-

ного наблюдения эффектов распространения СВ с использованием традиционных систем возбуждения на основе микрополосковой техники. Отметим также, что размеры источника колебаний также могут приводить к селективности возбуждаемых длин волн. Это, в частности, может проявляться в формировании отдельных зон возбуждения, отвечающих различным пространственным гармоникам в распределении полей источника [8]. Однако в данном случае это несущественно, поскольку рассматриваемый диапазон волновых чисел при выбранных размерах источника попадает в основную зону возбуждения.

На рис. 1 показано распространение СВ, возбуждаемой точечным источником, в середине прямоугольного образца пленки ЖИГ с плоскостными размерами  $3 \times 3$  мм<sup>2</sup>. Амплитуда входного

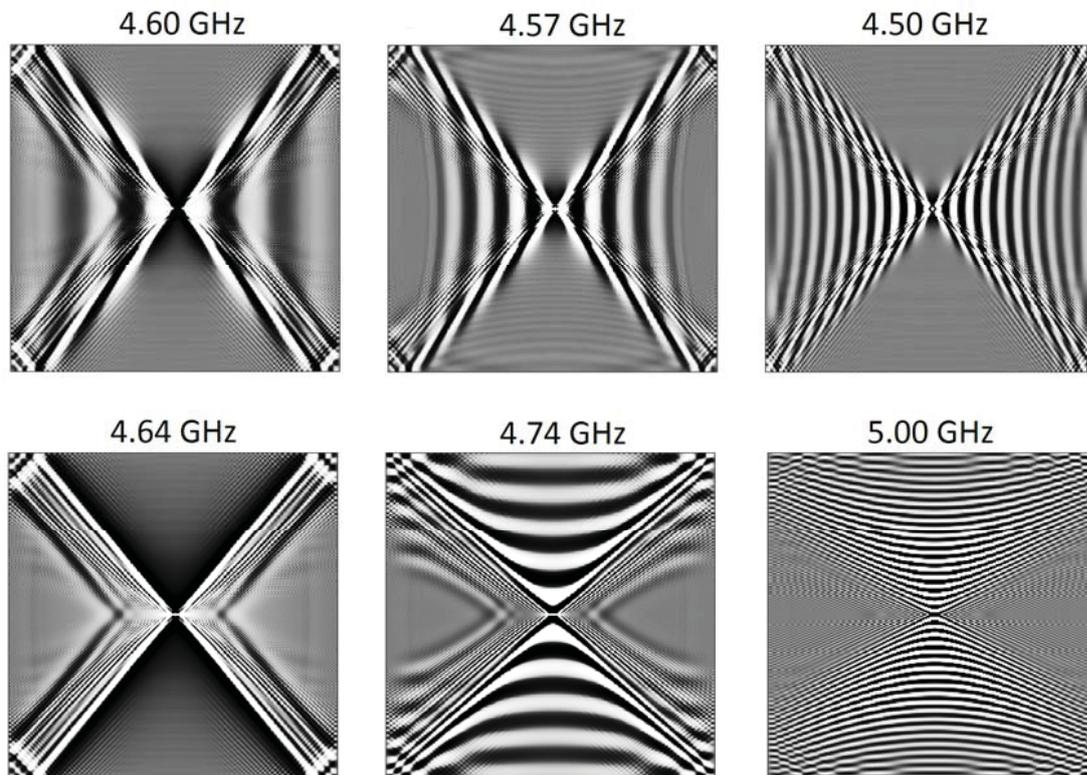


Рис. 1. Результаты расчета эффекта возбуждения и распространения СВ от точечного источника, расположенного в середине прямоугольного образца пленки ЖИГ толщиной 4 мкм, при касательном поле подмагничивания  $H = 1$  кЭ (ориентировано горизонтально) в виде мгновенных снимков высокочастотной намагниченности при  $t = 80$  нс. Верхние рисунки соответствуют частотам существования ООСВ, нижние – частотам ПСВ

Fig. 1. Snapshots of high-frequency magnetization at  $t = 80$  ns representing the modelled effect of spin wave (SW) excitation and propagation from the point emitter in the yttrium-iron garnet (YIG) film with thickness  $4 \mu\text{m}$  for the value of external in-plane field  $H = 1$  kOe (in the figures it is applied horizontally). Figures in the upper row correspond to the frequencies of existence of backward volume spin waves (BVS), in the bottom row – surface spin waves (SSW)



сигнала в виде высокочастотного магнитного поля, поляризованного вдоль нормали к пленке, была равна 8 А/м. Частоты входного сигнала указаны на рисунке. Частота  $f = 4.64$  ГГц соответствует частоте однородного ферромагнитного резонанса (ФМР)  $f_0$  для пленки ЖИГ, определяемой выражением [18]

$$f_0 = \sqrt{f_H^2 + f_H \cdot f_m}, \quad (1)$$

где  $f_H = \gamma \cdot H$ ,  $f_m = \gamma 4\pi M$ . Отметим, что частота  $f_0$  также является длинноволновой ( $k \rightarrow 0$ ) границей спектра ПСВ и ООСВ [20]. При этом частоты  $f_s > f > f_0$  ( $f_s = f_H + 0.5f_m$ ) соответствуют области возбуждения ПСВ, частоты  $f_H < f < f_0$  соответствуют области возбуждения ООСВ. Приведены мгновенные снимки распределения высокочастотной составляющей намагниченности  $m_z$  (нормальной к пленке) в фиксированный момент времени  $t = 80$  нс после начала возбуждения.

Следуя [16–19], можно предположить, что линии равной фазы на рис. 1 будут определять форму фокусирующих антенн для ООСВ и ПСВ на различных частотах с фокусным расстоянием в центре пленки. Чтобы убедиться в этом, мы оцифровывали выбранные линии равной фазы и аппроксимировали полученные графики полиномиальной функцией, которую затем использовали для задания форм фокусирующих антенн. Далее проводилось микромагнитное моделирование возбуждения и распространения СВ от этих фокусирующих антенн. На рис. 2 представлены результаты такого моделирования при возбуждении фокусирующими антеннами, форма которых была получена для ООСВ частотой  $f = 4.5$  ГГц (см. рис. 2 а, б, в) и для ПСВ частотой  $f = 4.74$  ГГц (см. рис. 2 з, д, е). Форма антенн на рисунке показана белым цветом. Исследовалось поведение СВ как на частотах  $f = 4.5$  ГГц и  $f = 4.74$  ГГц, для которых были рассчитаны формы преобразователей указанным выше способом (рисунки помечены звездочкой), так и на других частотах – выше и ниже указанных. Результаты, представленные на рис. 2, получены для пленки с плоскостными размерами, равными  $5 \times 5$  мм<sup>2</sup>, а время счета бралось равным 100 нс.

Видно, что для частот, для которых была получена форма фокусирующих антенн (см. рис. 2 б, е), положение фокусов хорошо совпадает с ожидаемым из моделирования с точечным источником. Положение точечного источника обозначено как **рс**. Ниже и выше этих частот для выбранной формы антенны фокус оказывается смещенным. Причем в пределах частотного

диапазона  $\approx \pm 70$  МГц качество фокусировки не страдает, а фокусное расстояние изменяется незначительно (не более чем на  $\approx 5\%$ ) (см. рис. 2, а, б, е). При отклонении частоты на  $\approx 260$  МГц от оптимальной, в случае с ПСВ (рис. 2, з), фокусное расстояние уменьшается на  $\approx 30\%$ , а функция фокусировки нарушается, сохраняясь лишь у центральной части антенны.

Рассмотрим теперь результат моделирования фокусирующих преобразователей СВ в существенно неоднородных пленочных волноводах. Будем рассматривать пленку ЖИГ, полученную ионно-лучевым распылением на подложке кремния (Si) [21]. В силу особенностей технологии [6, 21] осаждения пленок ЖИГ на Si-подложку пленки ЖИГ получаются неоднородными по толщине. Здесь для простоты мы будем обращаться к случаю пленки ЖИГ толщиной  $d = 500$  нм с распределением намагниченности по толщине, меняющейся по ступенчато-линейному закону от значений  $4\pi M_1 = 1000$  Гс на границе с подложкой до  $4\pi M_2 = 1500$  Гс на внешней границе. На рис. 3 для случая поля подмагничивания  $H = 500$  Э приведены дисперсионные кривые ПСВ, рассчитанные с помощью программ OOMMF и Semargl [22]. Построение дисперсионной зависимости из данных микромагнитного моделирования при этом проводилось в два этапа [22]. На первом этапе для заданной конфигурации образца с линейным профилем намагниченности и приложенного внешнего поля ( $H_y = 500$  Э) находилось равновесное распределение намагниченности. На втором этапе создавалось импульсное отклонение равновесного состояния и проводился анализ пространственно-временной эволюции намагниченности к равновесному состоянию, позволяющий определить спектр собственных волн системы. При проведении расчетов использовались следующие параметры: скорость релаксации СВ  $\alpha = 10^{-6}$ , гиромагнитное отношение:  $\gamma = 2.211 \cdot 10^{-8}$ , м/(А×с), обменная жесткость  $A$  полагалась однородной и равной  $4 \cdot 10^{-12}$  Дж/м. Анализ спектра структуры проводился для случая пленки размером  $550$  мкм ×  $550$  мкм ×  $500$  нм. При этом для внесения возмущения в основное состояние считалось, что в тонком слое  $x \times y \times z = 160$  нм ×  $550$  мкм ×  $500$  нм, играющим роль антенны СВ, подается импульс прямоугольной формы величиной в  $10^4$  А/м длительностью  $10^{-10}$  с. Вызванная импульсом пространственно-временная динамика намагниченности через временные интервалы  $0.5 \times 10^{-10}$  с (спектральные ширина  $\sim 20$  ГГц)

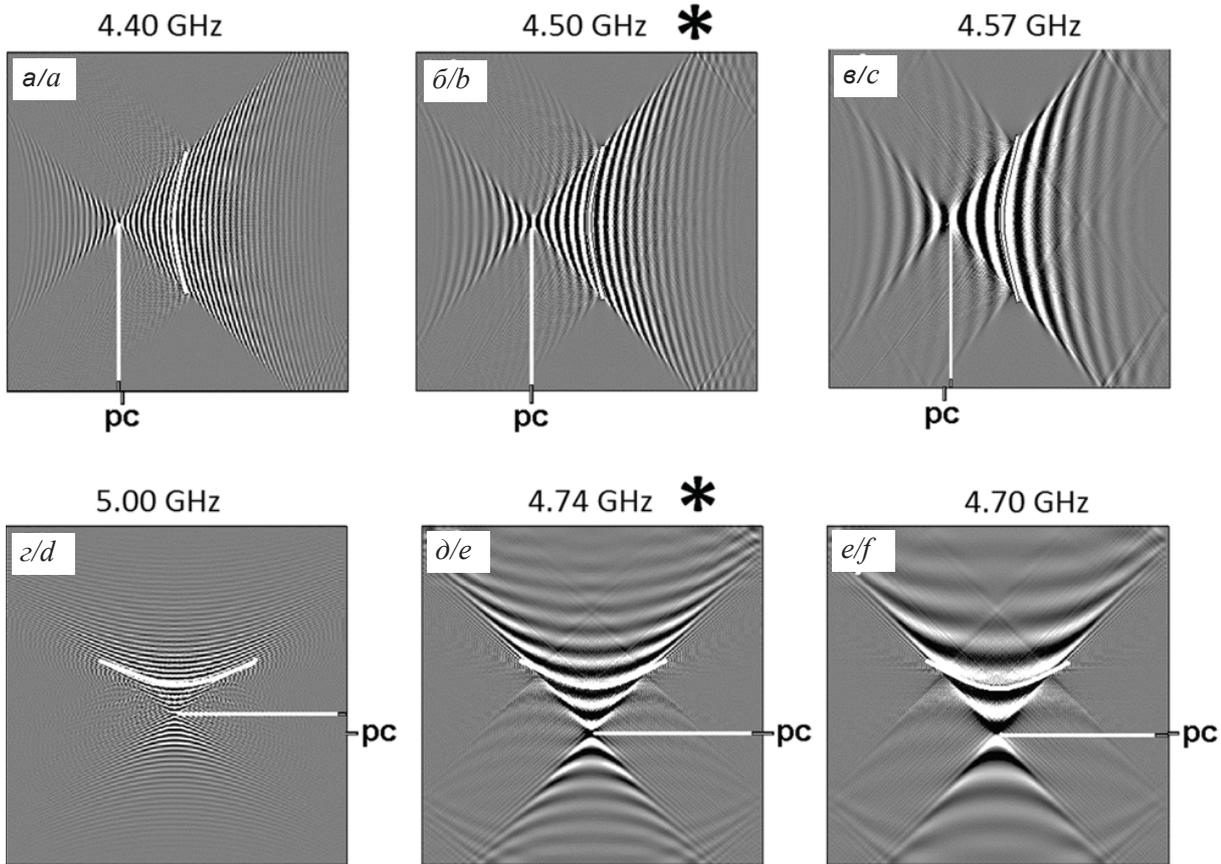


Рис. 2. Результаты расчета эффекта возбуждения и распространения СВ от фокусирующих антенн в пленке ЖИГ толщиной  $d=4$  мкм при касательном поле подмагничивания  $H=1$  кЭ (ориентировано горизонтально) в виде мгновенных снимков высокочастотной намагниченности при  $t=100$  нс. Верхние рисунки соответствуют частотам существования ООСВ (а, б, в), нижние рисунки – ПСВ (з, д, е). Антенны изображены белыми кривыми линиями. Положение точечного источника отмечено как **pc**. Места нахождения фокуса указаны прямыми белыми линиями. Рисунки под звездочками соответствуют случаям, когда СВ возбуждаются на расчетных частотах. В случаях, когда частоты возбуждения СВ не совпадают с расчетными, фокусировка СВ происходит не полностью, и положение фокуса не совпадает с положением точечного источника (а, в, з, е)

Fig. 2. Snapshots of high-frequency magnetization at  $t = 100$  ns representing the modelled effect of SW excitation and propagation from the focusing antennas in the YIG film with thickness  $4 \mu\text{m}$  for the value of external in-plane field  $H=1$  kOe (in the figures it is applied horizontally). Figures in the upper row correspond to the frequencies of existence of BVSW (a, b, c), in the bottom row – SSW (d, e, f). The antennas are represented by white, curved lines. The position of the point emitter is marked as **pc**. The focus locations are indicated by straight white lines. Figures under asterisks correspond to the cases when SW are excited at the calculated frequencies. In cases where the excitation frequencies of SW do not coincide with the calculated ones, the focusing of the SW does not take place completely and the position of the focus does not coincide with the position of the point emitter (a, c, d, f)

сохранялась в течение 200 нс. Далее полученное пространственно-временное распределение намагниченности по образцу обрабатывалось с помощью программы Semargl, которая проводит Фурье-преобразование полученного массива данных по времени и пространству. При этом Фурье-преобразование по временной реализации в каждом слое вдоль заданного направления даёт интенсивности частот, а Фурье-преобразование по пространству от положения этого слоя

относительно места воздействия импульса даёт соответствующее волновое число. В результате получается карта дисперсионной зависимости, показанная на рис. 3, откуда видно, что результаты расчета спектра ПСВ в пленке с линейным характером изменения намагниченности по толщине характерно оказываются близки к случаю двухслойной структуры, составленной из пленок с намагниченностью  $4\pi M_1$  и  $4\pi M_2$  [21]. Однако в отличие от случая двухслойных

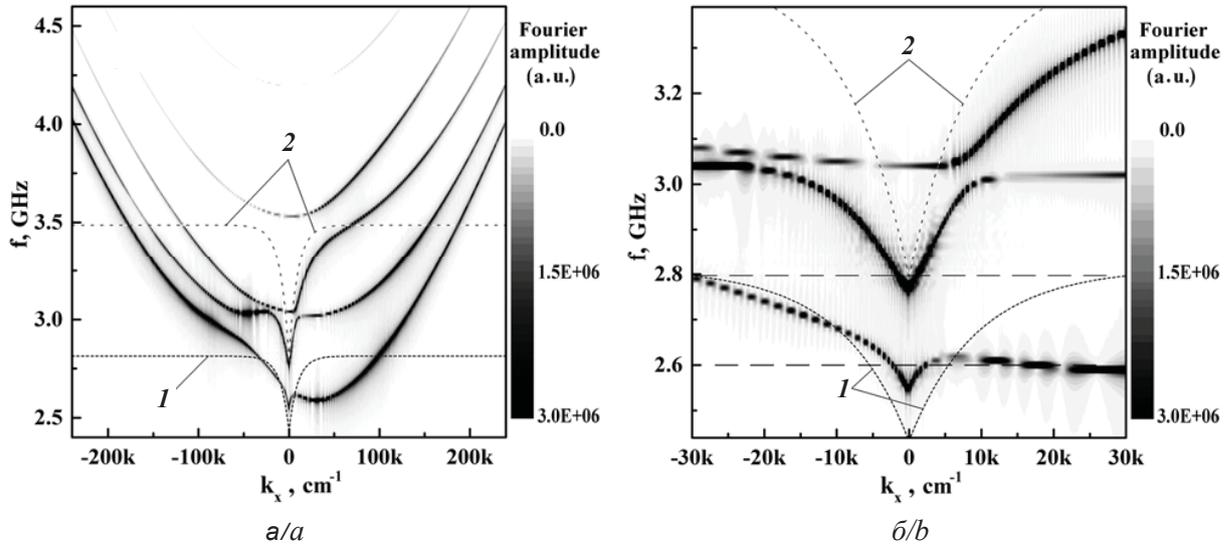


Рис. 3. Дисперсионные зависимости ПСВ в плёнке ЖИГ толщиной  $d=500$  нм при поле подмагничивания  $H=500$  Э со ступенчато-линейным характером изменения намагниченности по толщине от значений  $4\pi M_1=1000$  Гс на границе с подложкой до  $4\pi M_2=1500$  Гс на внешней границе в диапазоне волновых чисел от  $-2.4 \times 10^5$  до  $+2.4 \times 10^5$   $\text{см}^{-1}$  (а) и от  $-3 \times 10^4$  до  $+3 \times 10^4$   $\text{см}^{-1}$  (б). Горизонтальными штриховыми линиями (б) отмечены частоты  $f_1=2.6$  ГГц и  $f_2=2.8$  ГГц, на которых проводился расчет фокусирующих преобразователей. Линиями (1) и (2) показаны кривые, рассчитанные с помощью дисперсионного уравнения  $f = \gamma \sqrt{(H + 2\pi M)^2 - (2\pi M)^2 \exp(-2kd)}$  для дипольных ПСВ Деймона–Эшбаха для однородных пленок ЖИГ с намагниченностью  $4\pi M_1=1000$  Гс и  $4\pi M_2=1500$  Гс соответственно

Fig. 3. Dispersion curves for SSW in the YIG film with thickness  $d = 500$  nm and with a stepwise linear change of magnetization from the values  $4\pi M_1=1000$  G at the border with the substrate till  $4\pi M_2=1500$  G at the upper border. Results are presented for the range of wave numbers from  $-2.4 \times 10^5$  till  $+2.4 \times 10^5$   $\text{cm}^{-1}$  (a) and from  $-3 \times 10^4$  till  $+3 \times 10^4$   $\text{cm}^{-1}$  (b), for the applied field  $H=500$  Oe. Horizontal dashed lines (b) show frequencies  $f_1=2.6$  GHz and  $f_2=2.8$  GHz that were used in the simulation of focusing transducers. Lines (1) and (2) show the curves calculated using the dispersion equation  $f = \gamma \sqrt{(H + 2\pi M)^2 - (2\pi M)^2 \exp(-2kd)}$  of Damon-Eshbach dipole SSW in the uniform YIG films with magnetizations  $4\pi M_1=1000$  G and  $4\pi M_2=1500$  G, respectively

структур на основе однородных пленок с разными намагниченностями наблюдаются заметные отличия. В частности, наблюдается несовпадение результатов расчета частот длинноволновых ( $k \rightarrow 0$ ) границ дисперсионных кривых с длинноволновыми частотными границами спектра ПСВ, определяемыми формулой (1). Сказанное иллюстрируют дисперсионные кривые дипольных ПСВ Деймона–Эшбаха, показанные штриховыми (2) и (1) пунктирными линиями на рис. 3 и построенные с помощью дисперсионного уравнения ПСВ Деймона–Эшбаха для однородной «свободной» плёнки феррита толщиной  $d = 500$  нм [20]:

$$f = \gamma \sqrt{(H + 2\pi M)^2 - (2\pi M)^2 \exp(-2kd)}. \quad (2)$$

Кривая 2 отвечает плёнке ЖИГ с намагниченностью  $4\pi M_2=1500$  Гс, кривая (1) случаю  $4\pi M_1=1000$  Гс. Наиболее вероятная причина указанного несовпадения связана с ограниченными размерами структуры, использованной для моделирования, – СВ большей длины (в

пределе  $k \rightarrow 0$ ) просто не «помещаются» в заданный объем. Отметим, что в спектре пленки также видны обменные моды структуры, которые демонстрируют расталкивание в местах пересечения с модами ПСВ.

На рис. 4, а, б приведены результаты расчета волновых фронтов ПСВ с частотами  $f_1=2.6$  ГГц и  $f_2=2.8$  ГГц, возбуждаемых «точечным» источником, расположенным в центре пленки ЖИГ квадратной формы. Размеры пленки ЖИГ  $500$  мкм  $\times$   $500$  мкм  $\times$   $0.5$  мкм со ступенчато-линейно изменяющейся по толщине намагниченностью от  $1000$  Гс до  $1500$  Гс. Шаги по пространству:  $2$  мкм  $\times$   $2$  мкм  $\times$   $0.05$  мкм. Поле  $500$  Э направлено вдоль оси  $Oy$ . Волны возбуждаются «точечным» источником размером  $4$  мкм  $\times$   $4$  мкм с амплитудой СВЧ поля  $h_z=1$  Э, которое задается однородным по толщине пленки. Ось  $Oz$  считается направленной по толщине пленки. Приведены результаты расчета для трех значений координаты:  $z=0$ ,  $z=250$  нм,  $z=500$  нм.

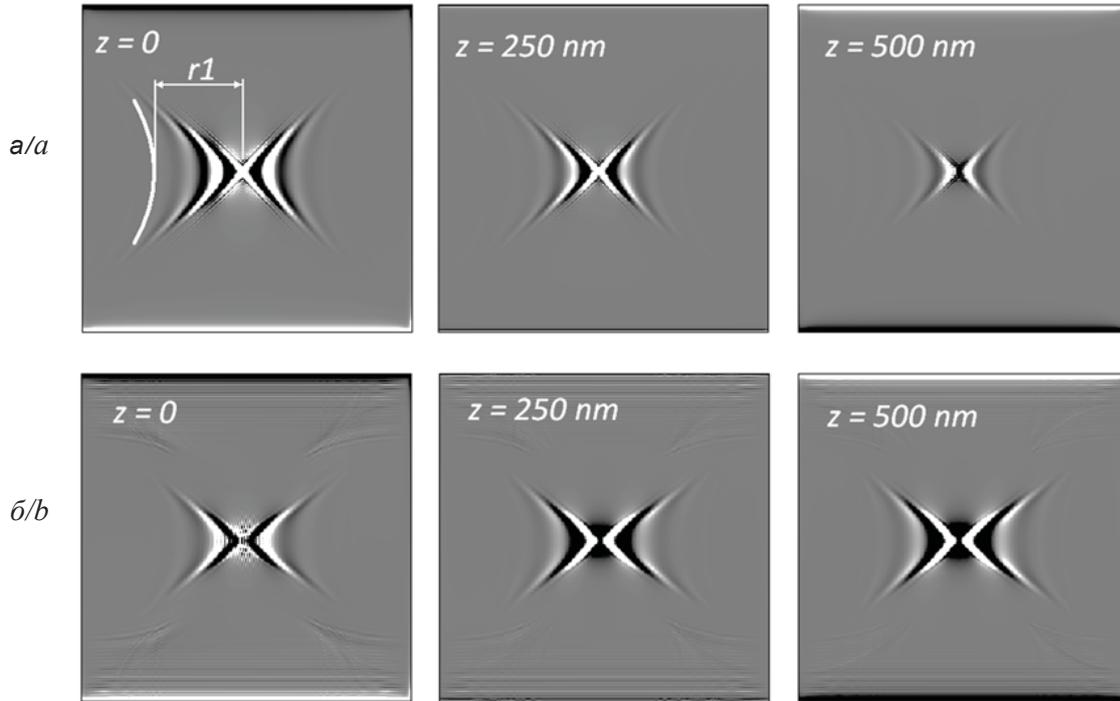


Рис. 4. Микромагнитное моделирование профиля фокусирующего преобразователя в пленке ЖИГ толщиной  $d=500$  нм при поле подмагничивания  $H=500$  Э со ступенчато-линейным характером изменения намагниченности по толщине от значений  $4\pi M_1=1000$  Гс на границе с подложкой до  $4\pi M_2=1500$  Гс на внешней границе. Частоты:  $f_1=2.6$  ГГц (а);  $f_2=2.8$  ГГц (б) выбраны так, чтобы отвечать различным веткам закона дисперсии ПСВ в пленке. Приведены результаты расчета для различных значений координаты  $z$  по толщине пленки

Fig. 4. Micromagnetic modeling of the focusing transducer profile in the YIG film with thickness  $d=500$  nm and with a stepwise linear change of magnetization across the thickness from the value  $4\pi M_1=1000$  G at the border with the substrate till  $4\pi M_2=1500$  G at the opposite border. The applied field had the value  $H=500$  Oe. Frequencies  $f_1=2.6$  GHz (a) and  $f_2=2.8$  GHz (b) correspond to different branches of the SSW dispersion in the film. Calculation results are shown for different values of  $z$ -coordinate across the film thickness

Можно видеть, что область вблизи точечного источника на выбранных частотах «расплывается». Характер «расплывания» определяется не только выбором частоты, но и координатой  $z$ . На частоте  $f_2 = 2.8$  ГГц расплывание проявляется при всех значениях координаты  $z$ , тогда как на частоте  $f_1 = 2.6$  ГГц расплывание вблизи верхней границы пленки, где намагниченность оказывается максимальна, практически отсутствует. Такое поведение является следствием влияния неоднородного обмена в структуре, приводящим к гибридизации поверхностных дипольных ПСВ с обменными объемными модами структуры. Видно, что интенсивность волны на частоте  $f_1 = 2.6$  ГГц, отвечающей нижней ветке закона дисперсии ПСВ в пленке, уменьшается с увеличением координаты  $z$ , а интенсивность волны на частоте  $f_2 = 2.8$  ГГц, отвечающей верхней ветке, наоборот, увеличивается.

На рис. 5 показаны результаты моделирования возбуждения и распространения ПСВ фокусирующей антенной, форма которой была получена в результате аппроксимации линии равной фазы, показанной белым цветом на рис. 4, а для частоты  $f = 2.6$  ГГц и  $z = 0$  нм. На рис. 5 для  $z=0$  нм показано фокусное расстояние  $r_2$ , которое в точности равно расстоянию  $r_1$  от точечного источника до линии равной фазы (см. рис. 4), использовавшейся для построения фокусирующей антенны.

#### Заключение

Таким образом, в рамках подхода, основанного на микромагнитном моделировании распространения спиновых волн, возбуждаемых точечным источником, предложен метод построения фокусирующих преобразователей для СВ в магнитных микроструктурах. Показана

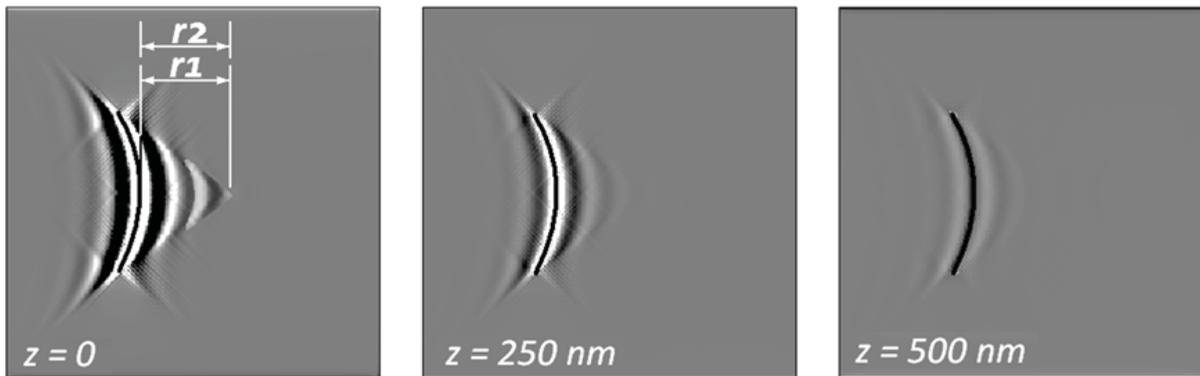


Рис. 5. Микромагнитное моделирование распространения ПСВ от фокусирующего преобразователя в пленке ЖИГ толщиной  $d = 500$  нм при поле подмагничивания  $H = 500$  Э со ступенчато-линейным характером изменения намагниченности по толщине от значений  $4\pi M_1 = 1000$  Гс на границе с подложкой до  $4\pi M_2 = 1500$  Гс на внешней границе. Частота  $f_1 = 2.6$  ГГц отвечает нижней ветке закона дисперсии ПСВ в пленке. Приведены результаты расчета для различных значений координаты  $z$  по толщине пленки. При заданных параметрах расчета расстояния  $r_1$  от точечного источника до антенны и  $r_2$  от антенны до точки фокуса оказываются в точности равны. Антенна показана черной кривой линией

Fig. 5. Micromagnetic modeling of the propagating SSW from the focusing transducer in the YIG film with thickness  $d = 500$  nm and with a stepwise linear change of magnetization across the thickness from the value  $4\pi M_1 = 1000$  G at the border with the substrate till  $4\pi M_2 = 1500$  G at the opposite border. The applied field had the value  $H = 500$  Oe. Frequency  $f_1 = 2.6$  GHz corresponds to the bottom branch of the SSW dispersion in the film. Calculation results are presented for different values of  $z$ -coordinate across the film thickness. With the given parameters of calculation, the distances  $r_1$  from the point emitter to the antenna and  $r_2$  from the antenna to the point of focus appear to be exactly equal. The antenna is shown as a black curved line

работоспособность метода как в случае пленок с однородным распределением параметров, так и в случае структур, характеризующихся существенно-неоднородным основным состоянием, для которых не удастся получить аналитическое выражение для закона дисперсии. Во втором случае численный подход остается единственно возможным способом рассчитать форму преобразователей для фокусировки волновых пучков СВ. Полученные результаты могут быть использованы при разработке устройств обработки информации на основе СВ.

#### Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-07-01092).

#### Список литературы

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. Магнетика – новое направление спинтроники и спин-волновой электроники // УФН. 2015. Т. 185, № 10. С. 1099–1128. DOI: 10.3367/UFNr.0185.201510m.1099
2. Khitun A. G., Kozhanov A. E. Magnonic Logic Devices // Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. 2017. Т. 17, вып. 4. С. 216–241. DOI: 10.18500/1817-3020-2017-17-4-216-241
3. Kozhevnikov A., Gertz F., Dudko G., Filimonov Yu., Khitun A. Pattern recognition with magnonic holographic memory device // Appl. Phys. Lett. 2015. Vol. 106, № 14. 142409.
4. Sadovnikov A. V., Odintsov S. A., Beginin E. N., Sheshukova S. E., Sharaevskii Yu. P., Nikitov S. A. Toward nonlinear magnonics: Intensity-dependent spin-wave switching in insulating side-coupled magnetic stripes // Phys. Rev. 2017. Vol. B 96. 144428.
5. Sadovnikov A. V., Davies C. S., Kruglyak V. V., Romanenko D. V., Grishin S. V., Beginin E. N., Sharaevskii Yu. P., Nikitov S. A. Spin wave propagation in a uniformly biased curved magnonic waveguide // Phys. Rev. 2017. Vol. B 96. 060401.
6. Stognij A. I., Lutsev L. V., Bursian V. E., Novitskii N. N. Growth and spin-wave properties of thin  $Y_3Fe_5O_{12}$  films on Si substrates // J. Appl. Phys. 2015. Vol. 118, July. 023905.
7. Sun Y., Song Y., Wu M. Growth and ferromagnetic resonance of yttrium iron garnet thin films on metals // Appl. Phys. Lett. 2012. Vol. 101, № 8. 082405.
8. Khivintsev Yu. V., Filimonov Yu. A., Nikitov S. A. Spin



- wave excitation in yttrium iron garnet films with micron-sized antennas // *Appl. Phys. Lett.* 2015. Vol. 106, № 5. 052407.
9. Yu H., d'Allivy Kelly O., Cros V., Bernard R., Bortolotti P., Anane A., Brandl F., Huber R., Stasinopoulos I., Grundler D. Sub-100 nm-wavelength spin wave propagation in metal/insulator magnetic nanostructures // *Scientific Reports*. 2014. Vol. 4. 6848. DOI: 10.1038/ncomms11255
  10. Jorzick J., Demokritov S. O., Hillebrands B., Baileul M., Fermon C., Guslienko K., Slavin A. N. Spin wave wells in nonellipsoidal micrometer size magnetic elements // *Phys. Rev. Lett.* 2002. Vol. 88, № 4. 047204.
  11. Hicken R. J., Barman A., Kruglyak V. V., Ladak S. Optical ferromagnetic resonance studies of thin film magnetic structures // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2003. Vol. 36, № 18. 2183.
  12. Donahue M., Porter D. Object Oriented Micro Magnetic Framework (OOMMF). Interagency Report NISTIR 6376 / National Institute of Standards and Technology. Gaithersburg, Maryland, Sept, 1999. 897 p.
  13. Berkov D. V., Gorn N. L. Micromagus – soft-ware for micromagnetic simulations. URL: 2008. <http://www.micromagus.de/> (дата обращения: 04.04.2018).
  14. Davies C. S., Sadovnikov A. V., Grishin S. V., Sharaevskii Y. P., Nikitov S. A., Kruglyak V. V. Generation of propagating spin waves from regions of increased dynamic demagnetising field near magnetic antidots // *Appl. Phys. Lett.* 2015. Vol. 107, № 16. 162401.
  15. Gieniusz R., Gruszecki P., Krawczyk M., Guzowska U., Stognij A., Maziewski A. The switching of strong spin wave beams in patterned garnet films // *Scientific Reports*. 2017. Vol. 7, № 08. 8771. DOI: 10.1038/s41598-017-06531-2
  16. Ваишковский А. В., Гречушкин К. В., Стальмахов А. В., Тюлюкин В. А. Фокусирующий преобразователь поверхностных магнитостатических волн // *Радиотехника и электроника*. 1986. Т. 31, № 4. С. 838–840.
  17. Ваишковский А. В., Гречушкин К. В., Стальмахов А. В., Тюлюкин В. А. Фокусировка объемных магнитостатических волн // *Радиотехника и электроника*. 1987. Т. 32, № 6. С. 1176–1183.
  18. Ваишковский А. В., Стальмахов А. В., Шахназарян Д. Г. Формирование, отражение и преломление пучков магнитостатических волн // *Известия вузов. Физика*. 1988. № 11. С. 57–75.
  19. Стальмахов А. В. Распространение волновых пучков магнитостатических волн в тонкопленочных структурах : автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. М., 1992. 35 с.
  20. Гуревич А. Г., Мелков Г. А. Магнитные колебания и волны. М. : Физматлит, 1994. 464 с.
  21. Sakharov V. K., Khivintsev Yu. V., Vysotskii S. L., Stognij A. I., Filimonov Yu. A. Enhanced Nonreciprocity of Magnetostatic Surface Waves in Yttrium-Iron-Garnet Films Deposited on Silicon Substrates by Ion-Beam Evaporation // *IEEE Magnetics Lett.* 2017. Vol. 8. 3704804. DOI:10.1109/LMAG.2017.2659638
  22. Dvornik M. Numerical Investigations of Spin Waves at the Nanoscale. PhD thesis. University of Exeter, U.K., 2011. 23 p.

#### Образец для цитирования:

Дудко Г. М., Кожевников А. В., Сахаров В. К., Стальмахов А. В., Филимонов Ю. А., Хивинцев Ю. В. Расчет фокусирующих преобразователей спиновых волн методом микромагнитного моделирования // *Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика*. 2018. Т. 18, вып. 2. С. 92–102. DOI: 10.18500/1817-3020-2018-18-2-92-102.

#### Calculation of Focusing Spin Wave Transducers Using the Method of Micromagnetic Simulation

G. M. Dudko, A. V. Kozhevnikov, V. K. Saharov, A. V. Stalmahov, Yu. A. Filimonov, Yu. V. Khivintsev

Galina M. Dudko, ORCID 0000-0002-7083-4399, Saratov branch of the Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences, 38, Zelenaya Str., Saratov, 410019, Russia, [dugal\\_2010@hotmail.com](mailto:dugal_2010@hotmail.com)

Alexander V. Kozhevnikov, ORCID 0000-0002-8904-475X, Saratov branch of the Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences, 38, Zelenaya Str., Saratov, 410019, Russia, [kzhavl@gmail.com](mailto:kzhavl@gmail.com)

Valentin K. Saharov, ORCID 0000-0001-7168-1198, Saratov branch of the Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics

of the Russian Academy of Sciences, 38, Zelenaya Str., Saratov, 410019, Russia, [valentin@sakharov.info](mailto:valentin@sakharov.info)

Andrey V. Stalmahov, ORCID 0000-0001-5428-721X, Saratov State University, 83, Astrahanskaya Str., Saratov, 410012, Russia, [stalmahov@sgu.ru](mailto:stalmahov@sgu.ru)

Yuri A. Filimonov, ORCID 0000-0002-2645-6669, Saratov branch of the Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences, 38, Zelenaya Str., Saratov, 410019, Russia, [yuri.a.filimonov@gmail.com](mailto:yuri.a.filimonov@gmail.com)

Yuri V. Khivintsev, ORCID 0000-0002-6228-7428, Saratov branch of the Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences, 38, Zelenaya Str., Saratov, 410019, Russia, [khivintsev@gmail.com](mailto:khivintsev@gmail.com)

**Background and Objectives:** Researches in the field of electronic circuit development for microwave informational systems



based on magnetization oscillations and waves have been performing since the 1960s of the last century. The surge of interest in spin waves (SW) during the last decade is caused by the perspective to use SW as information carriers on the sub-micromagnetic and nanometer scale that leads to the fabrication of devices on magnonic principles and a significant miniaturization of spin-wave devices. Besides, the effect of spin wave generation by the spin-polarized current in ferromagnetic nanostructures gives opportunities for possible integration of magnonic and spintronic devices. It should be supplemented that apart from the traditional application of spin waves for microwave signal processing, the possibility to fabricate the logic and holographic memory based on effects of propagation and interference of spin waves has been widely discussed recently. The aim of this work is to develop a new approach for calculating microwave transducers focusing spin waves in thin-film waveguides with a significantly non-uniform distribution of parameters based on the method of micromagnetic modeling. **Materials and Methods:** Micromagnetic simulations were performed by using the free software "Object Oriented Micromagnetic Framework" (OOMMF) provided by the National Institute of Standards and Technology. **Results:** We have shown the possibility to calculate the form of transducers focusing spin waves both in the films with a uniform distribution of magnetic parameters and in the films having the significantly non-uniform equilibrium state. In the last case, the numerical approach remains the only possible. **Conclusion:** In our work, we have proposed a new method to obtain the form of transducers focusing spin waves in magnetic microstructures. It is based on the approach of micromagnetic simulation of spin wave propagation after their excitation by the point emitter.

**Key words:** spin waves, wave beams, focusing transducers, micromagnetic simulation, non-uniform magnetic films.

**Acknowledgements:** This work was supported by the Russian Foundation for Basic Researches (project no. 16-07-01092).

## References

1. Nikitov S. A., Kaliabin D. V., Lisenkov I. V., Slavina A. N., Barabanenkov Yu. N., Osokin S. A., Sadovnikov A. V., Baginin E. N., Morozova M. A., Sharaevskii Yu. P., Filimonov Yu. A., Khivintsev Yu. V., Vysotskii S. L., Sakharov V. K., Pavlov E. S. Magnonics: a new research area in spintronics and spin wave electronics. *Phys. Usp.*, 2015, vol. 58, no. 10, pp. 1002–1028. DOI: 10.3367/UFNr.0185.201510m.1099
2. Khitun A. G., Kozhanov A. E. Magnonic Logic Devices. *Izv. Saratov. Univ. (N.S.), Ser. Physics*, 2017, vol. 17, iss. 4, pp. 216–241 (in Russian). DOI: 10.18500/1817-3020-2017-17-4-216-241.
3. Kozhevnikov A., Gertz F., Dudko G., Filimonov Yu., Khitun A. Pattern recognition with magnonic holographic memory device. *Appl. Phys. Lett.*, 2015, vol. 106, no.14, 142409.
4. Sadovnikov A. V., Odintsov S. A., Beginin E. N., Sheshukova S. E., Sharaevskii Yu. P., Nikitov S. A. Toward nonlinear magnonics: Intensity-dependent spin-wave switching in insulating side-coupled magnetic stripes. *Phys. Rev.*, 2017, vol. B 96, 144428.
5. Sadovnikov A. V., Davies C. S., Kruglyak V. V., Romanenko D. V., Grishin S. V., Beginin E. N., Sharaevskii Yu. P., Nikitov S. A. Spin wave propagation in a uniformly biased curved magnonic waveguide. *Phys. Rev.*, 2017, vol. B 96, 060401.
6. Stognij A. I., Lutsev L. V., Bursian V. E., Novitskii N. N. Growth and spin-wave properties of thin  $Y_3Fe_5O_{12}$  films on Si substrates. *J. Appl. Phys.*, 2015, vol. 118, July, 023905.
7. Sun Y., Song Y., Wu M. Growth and ferromagnetic resonance of yttrium iron garnet thin films on metals. *Appl. Phys. Lett.*, 2012, vol. 101, no. 8, 082405.
8. Khivintsev Yu. V., Filimonov Yu. A., Nikitov S. A. Spin wave excitation in yttrium iron garnet films with micron-sized antennas. *Appl. Phys. Lett.*, 2015, vol. 106, no. 5, 052407.
9. Yu H., d'Allivy Kelly O., Cros V., Bernard R., Borlototti P., Anane A., Brandl F., Huber R., Stasinopoulos I., Grundler D. Sub-100 nm-wavelength spin wave propagation in metal/insulator magnetic nanostructures. *Scientific Reports*, 2014, vol. 4, 6848. DOI: 10.1038/ncomms11255.
10. Jorzick J., Demokritov S. O., Hillebrands B., Baileul M., Fermon C., Gusliencko K., Slavin A. N. Spin wave wells in nonellipsoidal micrometer size magnetic elements. *Phys. Rev. Lett.*, 2002, vol. 88, no. 4, 047204.
11. Hicken R. J., Barman A., Kruglyak V. V., Ladak S. Optical ferromagnetic resonance studies of thin film magnetic structures. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2003, vol. 36, no. 18, 2183.
12. Donahue M., Porter D. *Object Oriented Micro Magnetic Framework (OOMMF)*. Interagency Report NISTIR 6376. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, Sept, 1999. 897 p.
13. Berkov D. V., Gorn N. L. Micromagus – soft-ware for micromagnetic simulations, 2008. Available at: <http://www.micromagus.de/> (accessed 4 April 2018).
14. Davies C. S., Sadovnikov A. V., Grishin S. V., Sharaevskii Yu. P., Nikitov S. A., Kruglyak V. V. Generation of propagating spin waves from regions of increased dynamic demagnetising field near magnetic antidots. *Appl. Phys. Lett.*, 2015, vol. 107, no.16, 162401.
15. Gieniusz R., Gruszecki P., Krawczyk M., Guzowska U., Stognij A., Maziewski A. The switching of strong spin wave beams in patterned garnet films. *Scientific Reports*, 2017, vol. 7, no. 8, 8771. DOI: 10.1038/s41598-017-06531-2
16. Vashkovskii A. V., Grechushkin K. V., Stalmakhov A. V., Tulukin V. A. Fokusriruyuschiy preobrazovatel poverkhnostnyh magnitostaticeskikh voln [Focusing transducer of surface magnetostatic waves]. *Radiotekhnika i elektronika*, 1986, vol. 31, no. 4, pp. 838–840 (in Russian).



17. Vashkovskii A. V., Grechushkin K. V., Stalmakhov A. V., Tulukin V. A. Fokusirovka objemnyh magnitostaticeskikh voln [Focusing of volume magnetostatic waves]. *Radiotekhnika i elektronika*, 1987, vol. 32, no. 6, pp. 1176–1183 (in Russian).
18. Vashkovskii A. V., Stalmakhov A. V., Shakhnazarian D. G. Formirovanie, otrazhenie i prelomlenie puchkov magnitostaticeskikh voln [Forming, reflection and refraction of magnetostatic waves beams]. *Izvestiya VUZ. Fizika*, 1988, no. 11, pp. 57–75 (in Russian).
19. Stalmakhov A. V. *Rasprostranenie volnovykh puchkov magnitostaticeskikh voln v tonkoplennykh strukturakh* [Propagation of magnetostatic waves beams in thin-film structures]. Thesis Diss. Dr. Sci. (Phys.), Moscow, 1992. 35 p. (in Russian).
20. Gurevich A. G., Melkov G. A. *Magnitnye kolebaniya i volny* [Magnetic oscillations and waves]. Moscow, Fizmatlit Publ., 1994. 464 p. (in Russian).
21. Sakharov V. K., Khivintsev Yu. V., Vysotskii S. L., Stognij A. I., Filimonov Yu. A. Enhanced Nonreciprocity of Magnetostatic Surface Waves in Yttrium-Iron-Garnet Films Deposited on Silicon Substrates by Ion-Beam Evaporation. *IEEE Magnetics Lett.*, 2017, vol. 8, 3704804. DOI: 10.1109/LMAG.2017.2659638
22. Dvornik M. *Numerical Investigations of Spin Waves at the Nanoscale*. PhD thesis. University of Exeter, U.K., 2011. 23 p.

---

**Cite this article as:**

Dudko G. M., Kozhevnikov A. V., Saharov V. K., Stalmahov A. V., Filimonov Yu. A., Khivintsev Yu. V. Calculation of Focusing Spin Wave Transducers Using the Method of Micromagnetic Simulation. *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Physics*, 2018, vol. 18, iss. 2, pp. 92–102 (in Russian). DOI: 10.18500/1817-3020-2018-18-2-92-102.

---