

Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2021. Т. 29, № 5
Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Applied Nonlinear Dynamics. 2021;29(5)

Научная статья

УДК 537.622.2; 537.862

DOI: 10.18500/0869-6632-2021-29-5-812-828

**Влияние зондирующего сигнала
на спектр выходных сигналов нелинейных спиновых волн в кресте
на основе волноводов из пленки железиттриевого граната**

А. В. Кожевников¹✉, Г. М. Дудко¹, Ю. В. Хивинцев^{1,2}, В. К. Сахаров¹, С. Л. Высоцкий^{1,2},
Ю. В. Никулин^{1,2}, М. Е. Селезнев^{1,2}, А. Г. Хитун³, Ю. А. Филимонов^{1,2}

¹Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Россия

²Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Россия

³Университет Калифорнии, Риверсайд, США

E-mail: ✉kzhavl@gmail.com, dugal_2010@hotmail.com, khivintsev@gmail.com,

valentin@sakharov.info, vysotsl@gmail.com, yvnikulin@gmail.com,

mixanich94@mail.ru, akhitun@engr.ucr.edu, yuri.a.filimonov@gmail.com

Поступила в редакцию 07.12.2020, принята к публикации 1.02.2021, опубликована 30.09.2021

Аннотация. *Тема.* Изменение спектра спиновых волн в магнитном кресте при прохождении в нем двух сигналов: сигнала накачки и зондирующего сигнала. *Цель работы* – выявить особенности формирования спектров выходных сигналов спиновых волн в мультипортовой структуре на основе пленки железиттриевого граната при возбуждении входной антенной одновременно двух магнитостатических волн: волны накачки и зондирующей волны, где мощность первой выше порога параметрической неустойчивости первого порядка. *Методы.* Исследовалось влияние зондирующего сигнала на спектр выходных сигналов спиновых волн четырехпортовой крестовидной структуры из пленки железиттриевого граната в виде двух ортогональных волноводов с расположенными на концах проволочными антеннами спиновых волн, где одна из антенн на поперечно намагниченном волноводе являлась входной. *Результаты.* Обнаружено, что выбором частоты зондирующего сигнала можно существенно (на 10 дБ) менять на выходных антеннах относительные уровни сигналов волн-сателлитов, которые являются вторичными поверхностными магнитостатическими волнами и появляются в спектре выходных сигналов в результате беспороговых процессов слияния параметрических спиновых волн, рождаемых волнами накачки. При этом на выходных антеннах, расположенных на ортогональных волноводах, частоты вторичных волн могут различаться. *Обсуждение.* Обнаруженный эффект связывается с изменением заселенности параметрическими спиновыми волнами спектра мультипортовой структуры под влиянием зондирующего сигнала, а также с наличием у структуры фильтрующих свойств и эффектами невязимого распространения спиновых волн в касательно намагниченных волноводах.

Ключевые слова: параметрические спиновые волны, интерференция спиновых волн, микроволновод, спинтроника, магноника, микромагнитное моделирование.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 17-19-01673). Работа А. Хитун была частично поддержана корпорацией INTEL (Премия #008635, спин-волновые

вычисления, руководитель проекта – доктор Д. Е. Никонов). Авторы выражают благодарность А. Г. Рожневу за полезное обсуждение результатов работы.

Для цитирования: Кожевников А. В., Дудко Г. М., Хивинцев Ю. В., Сахаров В. К., Высоцкий С. Л., Никулин Ю. В., Селезнев М. Е., Хитун А. Г., Филимонов Ю. А. Влияние зондирующего сигнала на спектр выходных сигналов нелинейных спиновых волн в кресте на основе волноводов из пленки железиттриевого граната // Известия вузов. ПНД. 2021. Т. 29, № 5. С. 812–828. DOI: 10.18500/0869-6632-2021-29-5-812-828

Статья опубликована на условиях Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0).

Article

DOI: 10.18500/0869-6632-2021-29-5-812-828

Effect of probing signal on the output signals spectrum of nonlinear spin waves in a cross based on waveguides of iron-yttrium garnet film

A. V. Kozhevnikov¹✉, G. M. Dudko¹, Y. V. Khivintsev^{1,2},
V. K. Sakharov¹, S. L. Vysotskii^{1,2}, Y. V. Nikulin^{1,2}, M. E. Seleznev^{1,2},
A. G. Khitun³, Y. A. Filimonov^{1,2}

¹Saratov Branch of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics, Russia

²Saratov State University, Russia

³University of California-Riverside, USA

E-mail: ✉kzhavl@gmail.com, dugal_2010@hotmail.com, khivintsev@gmail.com,
valentin@sakharov.info, vysotsl@gmail.com, yvnikulin@gmail.com,
mixonich94@mail.ru, akhitun@engr.ucr.edu, yuri.a.filimonov@gmail.com

Received 07.12.2020, accepted 1.02.2021, published 30.09.2021

Abstract. *Subject.* A change in the spectrum of spin waves (SW) in a magnetic cross is investigated when two signals pass through it: a pump signal and a probe signal. *Objective.* Detection of specific features in formation of the spectra of the output signals of SW in the multiport structure based on a yttrium iron garnet (YIG) film in the case of excitation of two magnetostatic surface waves (MSSW) simultaneously by the input antenna, where the first, with power higher than the first-order parametric instability threshold is the pump, and the second one is a probe. *Methods.* The experiments were performed for a cross structure from YIG film in the form of two orthogonal waveguides with the SW wire antennas placed at the ends of the waveguides, where one of the antennas on the transversely magnetized waveguide was considered as the input. *Result.* It was found that by choosing the probing signal frequency, one can significantly (by 10 dB) change the relative signal levels for the satellite waves at the output antennas, which are secondary MSSWs with some new frequencies and appear in the output signals spectrum as a result of the thresholdless processes of merging of parametric spin waves generated by MSSW pumping. In this case the secondary MSSWs frequencies can differ at the output antennas located on orthogonal waveguides. *Discussion.* The discovered effect is associated with the nonreciprocal nature of propagation of both the pumping wave and the waves generated at parametric instability condition in the structure.

Keywords: parametric spin waves, spin wave interference, microwave guide, spintronics, magnonics, micromagnetic modeling.

Acknowledgements. The study was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation (project no. 17-19-01673). The work of A. Khitun was supported in part by the INTEL CORPORATION (Award #008635, Spin Wave Computing) (Project director is Dr. D. E. Nikonov). The authors express their gratitude to A. G. Rozhnev for a useful discussion of the results of the work.

For citation: Kozhevnikov AV, Dudko GM, Khivintsev YV, Sakharov VK, Vysotskii SL, Nikulin YV, Seleznev ME, Khitun AG, Filimonov YA. Effect of probing signal on the output signals spectrum of nonlinear spin waves in a cross based on waveguides of iron-yttrium garnet film. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*. 2021;29(5):812–828. DOI: 10.18500/0869-6632-2021-29-5-812-828

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0).

Кожевников А. В., Дудко Г. М., Хивинцев Ю. В., Сахаров В. К., Высоцкий С. Л.,
Никулин Ю. В., Селезнев М. Е., Хитун А. Г., Филимонов Ю. А.
Известия вузов. ПНД, 2021, т. 29, № 5

Введение

Эффекты распространения спиновых волн (СВ) в мультипортовых магнонных структурах (магнонных сетях) активно исследуются с точки зрения построения на их основе энергоэффективных информационных технологий без использования переноса электрических зарядов [1–7]. В качестве одного из подходов к архитектуре магнонных сетей рассматривают решетки из пересекающихся ортогональных волноводов СВ [7–20]. В узлах (участках пересечения волноводов) касательно намагниченной крестовидной структуры эффективная передача сигнала СВ в ортогональный канал осуществляется в некоторой полосе частот $\Delta f^{\parallel,\perp}$, по порядку величины совпадающей с разницей частот длинноволновых границ f_0 спектров продольно (f_0^{\parallel}) и поперечно (f_0^{\perp}) намагниченных волноводов ($\Delta f^{\parallel,\perp} \approx \Delta f_0^{\parallel,\perp} = f_0^{\parallel} - f_0^{\perp}$) [12, 18]. Благодаря таким фильтрующим свойствам, магнитный крест с расположенными на концах четырьмя антеннами СВ будет выполнять функции интерферометра типа Маха–Цендера на частотах $f \in \Delta f_0^{\parallel,\perp}$. При этом эффекты интерференции линейных СВ в магнитных крестах могут быть использованы для создания магнонной голографической памяти [12, 21], технологий обработки баз данных [22], многоуровневой [23] и обратимой [24] логики, сенсоров магнитного поля [12, 20, 25] и определения свойств магнитных микрочастиц [26]. Возможности использования эффектов распространения в магнитных крестах нелинейных СВ для построения устройств магноники и спиновых вычислений изучены слабо. Между тем на основе эффектов распространения нелинейных СВ в мультипортовых структурах могут быть построены магнонные транзисторы [27], управляемые ответвители [28–30], полусумматоры [31, 32] и проведены вычисления резервуара [33]. С учетом сказанного, представляет интерес исследование влияния зондирующего (дополнительного) сигнала на спектр нелинейных СВ, распространяющихся в кресте на основе волноводов из пленки железиттриевого граната (ЖИГ) в условиях трехмагнонных (3М) распадов.

Отметим, что ранее исследовалось влияние 3М распадов на фильтрующие свойства креста из пленки ЖИГ, а также особенности формирования спектра выходных сигналов, обусловленные эффектами латерального квантования спектра и невязимности распространения СВ [34, 35]. Здесь приводятся результаты исследования особенностей формирования спектров выходных сигналов креста при возбуждении входной антенной одновременно двух поверхностных магнито-статических волн (ПМСВ), где первая с частотой f_p и мощностью P_p выше порога 3М неустойчивости P_{th} ($P_p > P_{th}$) является накачкой, а вторая с частотой $f_z \neq f_p$ и $P_z \approx P_{th}$ – зондирующая.

1. Эксперимент

Исследовалось распространение СВ в крестовидной структуре, показанной на рис. 1. Крест был сформирован методом лазерной абляции из пленки ЖИГ толщиной $d \approx 3.8$ мкм, выращенной методом жидкофазной эпитаксии на подложке из гадолиний-галлиевого граната толщиной 500 мкм. Пленка имела кристаллографическую ориентацию (111), эффективную намагниченность насыщения $4\pi M \approx 1876$ Гс и ширину линии ферромагнитного резонанса (ФМР) $\Delta H \approx 0.5$ Э. Волноводы имели ширину $w \approx 0.5$ мм и длину $L \approx 3$ мм, см. вставку к рис. 1.

Структура располагалась на немагнитном металлическом основании, где также были смонтированы коаксиальные переходы, соединенные с четырьмя антеннами СВ из золотой проволоки диаметром 30 мкм и длиной около 0.6 мм, расположенными на расстоянии 100...200 мкм от краев волноводов. Антенна 1 использовалась для возбуждения СВ, а остальные (2–4) – в качестве приемных. Макет помещался в зазор между полюсами электромагнита так, что магнитное поле \vec{H} лежало в плоскости структуры и ориентировалось вдоль проволоочной антенны 1, что отвечает геометрии возбуждения ПМСВ Дэймона–Эшбаха [36, 37].

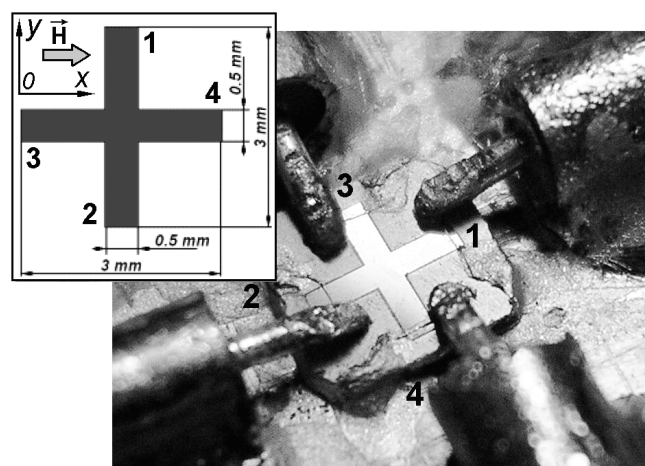


Рис. 1. Вид исследуемой структуры и экспериментального макета. Цифрами 1–4 показаны золотые проволочные антенны диаметром 30 мкм и длиной 0.6 мм, отстоящие от краев креста на расстояния 100–200 мкм. На входную антенну 1 подается сигнал накачки на частоте $f_p \approx 3.01$ ГГц и зондирующий сигнал $f_z \approx 2.977$ ГГц мощностью $P \approx 0.001 \dots 10$ мВт. На вставке приведена геометрия задачи и плоскостные размеры структуры

Fig. 1. View of the structure under study and the experimental model. Numbers 1–4 show gold wire antennas with a diameter of 30 μm and a length of 0.6 mm, spaced from the edges of the cross at a distance of 100–200 μm . A pump signal at a frequency of $f_p \approx 3.01$ GHz and a probing signal $f_z \approx 2.977$ GHz with a power of $P \approx 0.001 \dots 10$ mW are fed to the input antenna 1. The inset shows the geometry of the problem and the planar dimensions of the structure

На рис. 2 показана блок-схема экспериментальной установки. На входную антенну 1 через резистивный СВЧ-тройник (3), аттенуаторы (5) и вентили (6) подавались сигналы накачки частотой $f_p \approx 3.01$ ГГц и зондирующей волны $f_z \approx 2.977$ ГГц с генераторов СВЧ Г4-80 (1 и 1*). При этом максимальный уровень падающей мощности составлял $P_{\text{in}} \approx 10$ мВт в частотном диапазоне 2.56–4 ГГц. Выходные сигналы с портов 2–4 исследуемой структуры через СВЧ-переключатель и СВЧ широкополосный усилитель Agilent Technologies Preamplifier 87405C

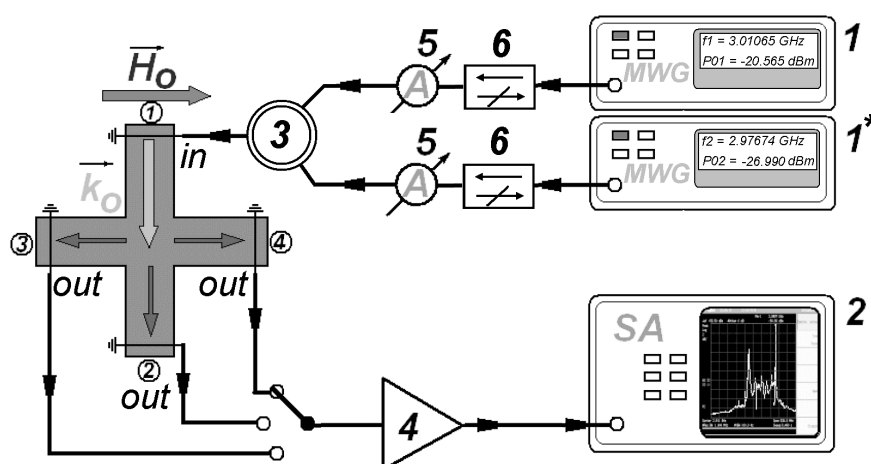


Рис. 2. Блок-схема экспериментальной установки: 1, 1* – генератор сигналов СВЧ Г4-80; 2 – анализатор спектра Agilent N9320A; 3 – резистивный СВЧ-тройник 50 Ом, 0...12 ГГц; 4 – широкополосный усилитель Agilent Technologies Preamplifier 87405C; 5 – аттенуатор; 6 – широкополосный ферритовый вентиль диапазона частот 2...4 ГГц

Fig. 2. Block diagram of the experimental setup: 1, 1* – microwave signal generator G4-80; 2 – spectrum analyzer Agilent N9320A; 3 – resistive microwave tee 50 Ohm, 0...12 GHz; 4 – broadband amplifier Agilent Technologies Preamplifier 87405C; 5 – attenuator; 6 – broadband ferrite gate in the frequency range 2...4 GHz

(4) поступали на анализатор спектра Agilent N9320A (2). Эксперименты выполнялись при магнитном поле $H = 448$ Э, при котором для выбранных частот $f_{p,z}$ выполняется условие [35, 36]:

$$f_{p,z} \geq 2 f_{\min}, \quad (1)$$

где f_{\min} – минимальная частота (частота «дна») в спектре СВ, которая в пренебрежении влиянием неоднородного обмена и полей анизотропии совпадает с нижней границей спектра обратных объемных спиновых волн (ООСВ), бегущих вдоль направления поля H $f_{\min} = f_H = \gamma H$, $\gamma = 2.8$ МГц/Э – гиромангнитное отношение в ЖИГ. При выполнении (1) для ПМСВ на частотах $f_{p,z}$ могут выполняться необходимые для 3М распадов законы сохранения [38]

$$f_{p,z} = f_1 + f_2, \quad (2)$$

$$\vec{k}_{p,z} = \vec{k}_1 + \vec{k}_2. \quad (3)$$

В законах сохранения (2), (3) частоты $f_{p,z,1,2}$ и волновые векторы $\vec{k}_{p,z,1,2}$ соответствуют накачке, зондирующей волне и параметрическим спиновым волнам (ПСВ), соответственно. При этом для накачки (f_p, \vec{k}_p) и зондирующей волны (f_z, \vec{k}_z) значения $f_{1,2}$ и $\vec{k}_{1,2}$, в общем случае не совпадают.

Пороговые значения падающей мощности P_{th} , при которых возбуждаемые в кресте ПМСВ становились неустойчивыми по отношению к 3М распадам, определялись аналогично [34, 35] по возникновению отклонения от линейной зависимости $P_i^{out}(f_{p,z}) = P_i^{out}(P_1(f_{p,z}))$, где $P_1(f_{p,z})$ – мощность на частоте $f_{p,z}$, поступающая на входную антенну 1 (см. рис. 1 и 2), P_i^{out} – мощность сигнала с i -й ($i = 2...4$), выходной антенны. Для выбранных частот $f_p \approx 3.01$ ГГц и $f_z \approx 2.977$ ГГц и поля $H \approx 448$ Э пороговые значения падающей мощности составили $P_{th,p} \approx \approx 3.9$ мкВт и $P_{th,z} \approx 2.0$ мкВт. При этом мощность ПМСВ составляла 10...30% от падающей.

При достаточном превышении на входной антенне падающей мощности P_{in} на частоте сигнала накачки f_p над порогом 3М распада $P_{th,p}$, которое в рассматриваемом случае характеризуется уровнем надкритичности $C_p = 10 \log(P/P_{th,p}) > 3$ дБ, в спектре сигнала на выходных антеннах 2...4 появлялись спутники с частотами $f_z \neq f_p$. Сказанное иллюстрируют спектры с выходных антенн, показанные в ряду (А) на рис. 3 и 4, отвечающих надкритичностям $C_p \approx 3.3$ дБ (рис. 3) и $C_p \approx 7$ дБ (рис. 4). Из сравнения спектров, представленных в ряду (А) на рис. 3 и 4, можно видеть, что число частот спутников и их относительный уровень сигнала A_s определяются уровнем надкритичности C_p и могут заметно различаться в спектрах сигналов с выходов 2–4.

Влияние зондирующей ПМСВ на спектр сигнала, наблюдаемого с выходных антенн 2–4 на частоте $f_z \approx 2.977$ ГГц и с надкритичностью $C_z \approx 0$ и $C_z \approx 0.5...1$ дБ, иллюстрируют изображения спектров на рис. 3 и 4, ряд (В). Видно, что в присутствии зондирующего сигнала спутники, обозначенные звездочками, меняют свой уровень сигнала A_s . При этом величина изменений уровня ΔA_s зависит от уровня надкритичности накачки и определяется выбором выходной антенны. Спектр зондирующего сигнала не содержит никаких составляющих кроме частоты $f_z \approx 2.977$ ГГц.

1.1. Спектр на выходе 2. На выходной антенне 2 особенно заметные изменения ($\Delta A_s > 10$ дБ) происходят при $C_p \approx 3.3$ дБ для спутника на частоте $f_{s1} \approx 3.04413$ ГГц, отстоящего от частоты накачки на $\Delta f_s \approx f_{s1} - f_p \approx 33.92$ МГц, см. ряд (В) на рис. 3. В отсутствие зондирующего сигнала относительный уровень сигнала этого спутника не превышал $A_{s1} \leq -70.6$ дБ над уровнем шума (около -72 дБ) в структуре, см. ряд (А) на рис. 3. При подаче зондирующего сигнала с надкритичностью $C_z \approx 0$ дБ относительный уровень сигнала спутника на частоте $f_{s1} \approx 3.04413$ ГГц вырастает на порядок. Одновременно спутник с частотой $f_{s2} \approx 2.88696$ ГГц уменьшает уровень на величину $\Delta A_{s2} \approx 6$ дБ и становится неразличим на уровне шума. Кроме того, в спектре появляется дополнительный спутник с частотой

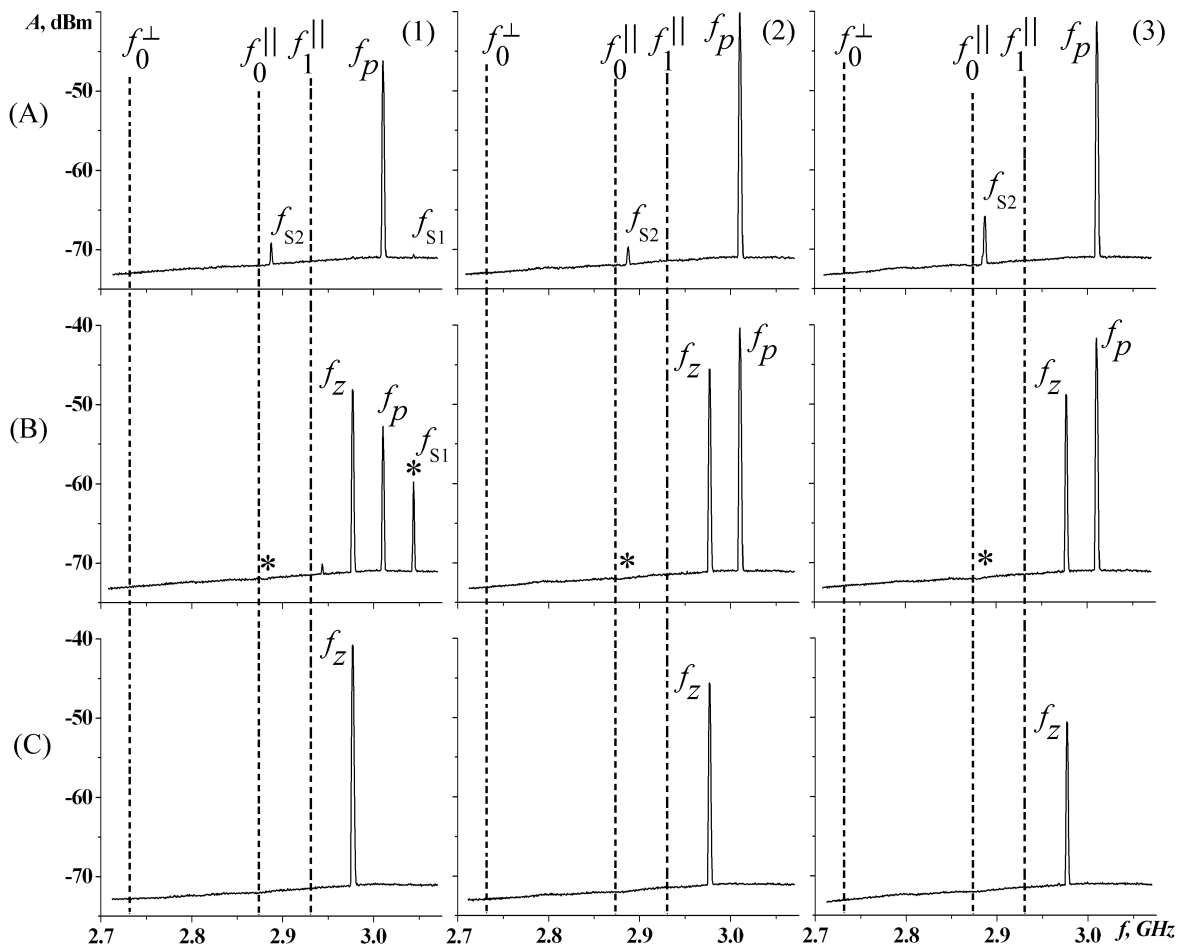


Рис. 3. Вид спектра сигнала на выходных антеннах 2–4 (колонки 1–3, соответственно) крестовидной структуры: ряд (A) – спектр сигнала накачки $f_p \approx 3.01$ ГГц и надкритичности $C_p \approx 3.3$ дБ в отсутствие зондирующего сигнала; ряд (B) – спектр сигнала накачки в присутствии зондирующего сигнала; ряд (C) – выходной спектр зондирующего сигнала частотой $f_z \approx 2.977$ ГГц и надкритичностью $C_z \approx 0$ дБ в отсутствие сигнала накачки. Звездочками отмечены изменения в спектре сигнала на выходах 2–4. Изменения, отмеченные звездочкой, испытывают сигналы спутников с частотами $f_{s1} \approx 3.04413$ ГГц и $f_{s2} \approx 2.88696$ ГГц при подаче на входную антенну зондирующего сигнала. Магнитное поле $H = 448$ Э направлено параллельно входной антенне 1 (см. рис. 1 и 2). Для всех измерений $\text{RBW} = 1$ МГц (RBW – ширина полосы пропускания разрешающего фильтра анализатора спектра) и шкала уровней дБм приведена для сигналов, полученных с выхода СВЧ-усилителя

Fig. 3. View of the signal spectrum at the output antennas 2–4 (columns 1–3, respectively) of a cross-shaped structure: row (A) – the spectrum of the pump signal $f_p \approx 3.01$ GHz and overcriticality $C_p \approx 3.3$ dB in the absence of the probing signal; row (B) – spectrum of the pump signal in the presence of the probing signal; row (C) is the output spectrum of the probing signal with a frequency $f_z \approx 2.977$ GHz and overcriticality $C_z \approx 0$ dB in the absence of the pump signal. Asterisks mark changes in the signal spectrum at outputs 2–4. Changes marked with an asterisk are experienced by signals from satellites with frequencies $f_{s1} \approx 3.04413$ GHz and $f_{s2} \approx 2.88696$ GHz when a probing signal is applied to the input antenna. The magnetic field $H = 448$ Oe is directed parallel to the input antenna 1 (see Figures 1 and 2). For all measurements $\text{RBW} = 1$ MHz (RBW is the bandwidth of the resolution filter of the spectrum analyzer) and the dBm level scale is given for signals received from the output of the microwave amplifier

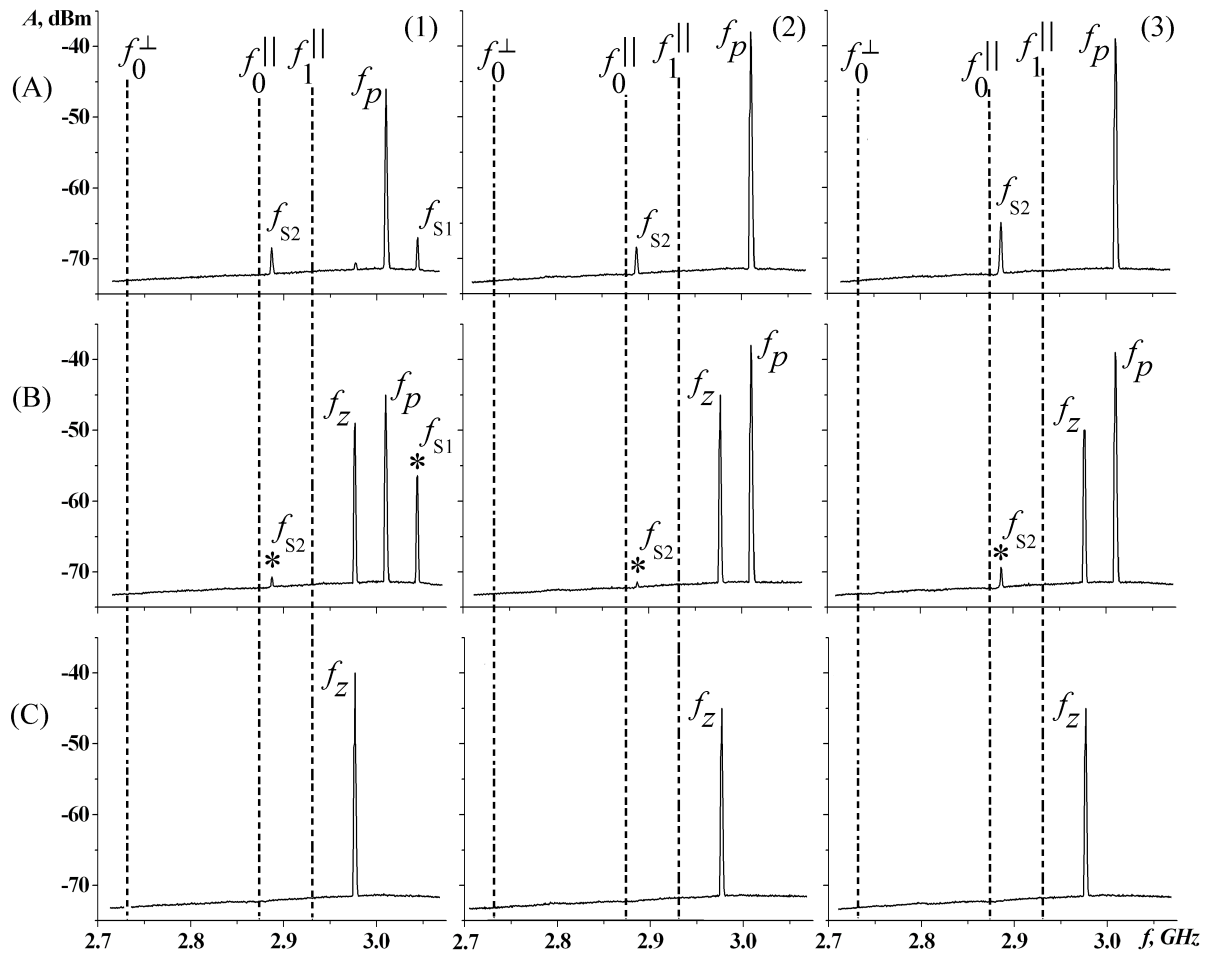


Рис. 4. Вид спектра сигнала на выходных антеннах 2–4 (колонки 1–3, соответственно) крестовидной структуры при уровнях надкритичности накачки $C_p \approx 7$ дБ и зондирующего сигнала $C_z \approx 0$ дБ. Все обозначения соответствуют рис. 3. Магнитное поле $H = 448$ Э направлено параллельно входной антенне 1 (см. рис. 1 и 2). Для всех измерений $\text{RBW} = 1$ МГц (RBW – ширина полосы пропускания разрешающего фильтра анализатора спектра) и шкала уровней dBm приведена для сигналов, полученных с выхода СВЧ усилителя

Fig. 4. The form of the signal spectrum at the output antennas 2–4 (columns 1–3, respectively) of a cruciform structure at the pump overcriticality levels $C_p \approx 7$ dB and the probing signal $C_z \approx 0$ dB. All designations correspond to figure 3. The magnetic field $H = 448$ Oe is directed parallel to the input antenna 1 (see figures 1 and 2). For all measurements $\text{RBW} = 1$ MHz (RBW is the bandwidth of the resolution filter of the spectrum analyzer) and the dBm level scale is given for the signals received from the output of the microwave amplifier

$f_{s3} \approx 2.943$ ГГц и уровнем $A_{s3} \approx -71$ дБ. При этом уровень надкритичности накачки составлял $C_p \approx 3.3$ дБ.

На рис. 4 приведены спектры сигнала с антенны 2 при уровнях надкритичности накачки $C_p \approx 7$ дБ и зондирующего сигнала $C_z \approx 0.5...1$ дБ. Из сравнения спектров накачки, показанных в ряду (А) на рис. 3 и 4, можно видеть, что с ростом C_p наблюдается рост уровня спутников с частотами $f_{s2} \approx 2.88696$ ГГц и $f_{s1} \approx 3.04413$ ГГц примерно на 1...3 дБ. Кроме того, в спектре накачки появляется дополнительный спутник на частоте $f_{sz} \approx f_z \approx 2.977$ ГГц с относительным уровнем $A_{sz} \approx -71$ дБ. При подаче зондирующего сигнала спутник с частотой $f_{s1} \approx 3.04413$ ГГц увеличивает свой уровень на $\Delta A_{s1} \approx 12$ дБ, а относительный уровень сигнала спутника с частотой $f_{s2} \approx 2.88696$ ГГц уменьшается на $\Delta A_{s2} \approx -3$ дБ. Кроме того, как и в случае, показанном на рис. 3, появляется дополнительный спутник с частотой $f_{s3} \approx 2.943$ ГГц и относительным уровнем сигнала $A_{s3} \approx -70$ дБ.

1.2. Спектр на выходах 3 и 4. Из рис. 3 и 4 можно видеть, что спектры выходных сигналов с антенн 3 и 4 различаются между собой лишь по уровню сигналов. При этом они заметно отличаются от рассмотренных выше спектров с выхода 2. При выбранных значениях параметров эксперимента на выходах 3 и 4 в спектре сигнала накачки присутствует только лишь спутник на частоте $f_{s2} \approx 2.88696$ ГГц с относительным уровнем сигнала $A_{s2}^4 \approx -65$ дБ на выходе 4 и $A_{s2}^3 \approx -68$ дБ на выходе 3, см. ряды (А) на рис. 3 и 4. В присутствии зондирующей ПМСВ относительный уровень сигнала спутника снижается, см. ряды (В) на рис. 3 и 4. Причем в случае, показанном на рис. 3, относительный уровень сигнала спутника падает до уровня шумов, тогда как при более высоких уровнях надкритичности накачки $C_p \approx 6$ дБ и зондирующего сигнала $C_z \approx 0.5...1$ дБ спутник сохраняется в спектре выходного сигнала, но с уровнем на 2...3 дБ ниже.

Отмеченные изменения в спектре выходных сигналов наблюдались только для значений частоты зондирующего сигнала из интервала $2.9755 \text{ ГГц} \leq f_z \leq 2.9795 \text{ ГГц}$. С ростом надкритичности как накачки, так и зондирующего сигнала эффект сохранялся до значений $C_{p,z} \approx 12...16$ дБ. При $C_{p,z} > 17$ дБ спектры накачки и зондирующего сигналов принимали шумовой характер [34, 35] и селективность воздействия зондирующего сигнала на спектр выходных сигналов исчезала.

2. Обсуждение результатов эксперимента

Отметим, что механизмы появления спутников в спектре сигнала СВ, прошедших через крест из волноводов ЖИГ в условиях 3М распадов, обсуждались ранее в работах [34, 35]. Было показано, что отличие спектров сигналов на выходах 3 и 4 по сравнению с выходом 2 обусловлено как фильтрующими свойствами креста, так и ориентацией антенн на концах поперечно и продольно намагниченных волноводов, см. рис. 1 и 2. Антенна 2 параллельна входной антенне 1, что отвечает условиям оптимального приема ПМСВ. Антенны 3 и 4 расположены на концах параллельно намагниченного волновода, что оптимально для приема ООСВ.

Для крестовидной структуры, составленной из волноводов, характеризуемых соотношением линейных размеров ($L \gg w \gg d$), длинноволновые границы спектров поперечно f_0^\perp и продольно f_0^\parallel намагниченных волноводов определяются выражениями [12, 18]:

$$f_0^\perp \approx f_0 \left(1 - \frac{N_w f_m (3f_H + f_m)}{2f_0^2} \right), \quad (4)$$

$$f_0^\parallel \approx f_0 \left(1 + \frac{N_w f_m f_H}{2f_0^2} \right), \quad (5)$$

где N_w – коэффициент размагничивания по ширине волновода и в рассматриваемом случае

имеет величину $N_w \approx 0.015$ [34, 35], $f_0 = \sqrt{f_H^2 + f_H f_m}$ длинноволновая ($k \rightarrow 0$) граница спектров ПМСВ и ООСВ в пленке, $f_s = f_H + 0.5f_m$, $f_H = \gamma H$, $f_m = \gamma 4\pi M$. При выбранных параметрах эксперимента рассчитанные с помощью (4) и (5) значения частот составляют $f_0^\perp \approx 2.732$ ГГц, $f_0^\parallel \approx 2.874$ ГГц, и их положение в спектре выходных сигналов на рис. 3 показано вертикальными пунктирными линиями. Можно видеть, что, как частоты f_p и f_z , так и частоты спутников расположены выше длинноволновой границы спектра ООСВ продольно намагниченного волновода f_0^\parallel . Исключение может составлять спутник с частотой $f_s \approx 2.88696$ ГГц, который оказывается близок к частоте f_0^\parallel . Такое расположение спутников по отношению к частотам f_0^\perp и f_0^\parallel , а также анализ распределения намагниченности в кресте на этих частотах [39] показывает, что они имеют характер ПМСВ. Именно этим можно объяснить большое число наблюдаемых спутников на выходной антенне 2 по сравнению с антеннами 3 и 4, ориентация которых для приема ПМСВ не оптимальна. Присутствие на антеннах 3 и 4 спутника с частотой $f_s \approx 2.88696$ ГГц можно объяснить близостью его частоты к частоте длинноволновой границы ООСВ f_0^\parallel .

Отметим также, что наблюдаемые в спектре спутники являются вторичными ПМСВ или ООСВ, образующимися в результате беспороговых процессов слияния ПСВ с законами сохранения [40]

$$f_1 + f_2 = f_s, \quad (6)$$

$$\vec{k}_1 + \vec{k}_2 = \vec{k}_s. \quad (7)$$

Входящие в (6), (7) частота f_s и волновой вектор \vec{k}_s спутника отвечают вторичным СВ, которые соответствуют собственной моде (волне) креста и поэтому способны добежать и быть принятыми выходными антеннами. Отметим, что попадание продуктов слияния ПСВ, определяемых законами (6), (7), в спектр СВ-структуры обеспечивает резонансное накопление сигнала и позволяет его выделить над уровнем теплового шума системы. То обстоятельство, что при этом оказывается выполненным условие $f_s \neq f_p$, следует связать с тем, что в процессах (6) и (7) участвуют параметрические спиновые волны с частотами $f_1 \neq f_2$, причем одна из них имеет частоту $f_1 = f_p/2$, а другая $f_2 = f_s - f_p/2$ [41].

Поскольку спутники образуются в результате беспороговых процессов слияния ПСВ вида (6), (7), величина относительного уровня сигнала спутников A_s связана с числами параметрических спиновых волн в областях (f_1, \vec{k}_1) и (f_2, \vec{k}_2) соотношением

$$A_s \propto n_{01}(f_1, \vec{k}_1) \cdot n_{02}(f_2, \vec{k}_2), \quad (8)$$

где $n_{01}(f_1, \vec{k}_1)$ и $n_{02}(f_2, \vec{k}_2)$ – равновесные числа ПСВ заполнения в (f, k) -пространстве (спектре СВ), установившиеся под влиянием накачки частотой f_p и мощностью $P_p > P_{th}$ в результате процессов (2), (3). Если предположить, что процессы (2) и (3) с участием зондирующей волны могут приводить как к изменению числа уже существующих ПСВ $n_{1,2}(f_{1,2}, k_{1,2}) = n_{01,2}(f_{1,2}, k_{1,2}) + \delta n_{1,2}(f_{1,2}, k_{1,2})$, так и к появлению ПСВ в других областях (f, k) -пространства, то в спектре выходного сигнала накачки могут появиться новые частотные составляющие или наблюдаться изменения относительного уровня сигналов уже существующих спутников. Разумеется, указанные изменения спектра выходного сигнала возможны, если величины $\delta n_1(f_1, k_1)$ будут существенно превышать уровень тепловых спиновых волн $n_T(f, k)$.

Далее учтем, что спутники в спектре накачки формируются при процессах (6), (7) с участием ПСВ на половинной частоте накачки $f_1 = f_p/2$, число которых $n_{01}(f_1, k_1)$ при фиксированном уровне C_p стационарно. Если спутников несколько, как это имеет место в нашем случае, то число $n_{01}(f_1, k_1)$ распределяется между ними. Зондирующий сигнал, в случае если

его частота f_z будет удовлетворять законам сохранения (2), (3) с участием ПСВ, созданных накачкой, может привести к изменению числа ПСВ $n_{02}(f_2, k_2)$ на частоте $f_2 = f_z/2$ даже при $C_z \leq 0$ [41, 42]. Если изменение $n_{02}(f_2, k_2)$ будет существенным, это вызовет перераспределение числа ПСВ на половинной частоте накачки между спутниками в спектре, что при неизменности $n_{01}(f_1 = f_p/2, k_1)$ приведет к росту уровня одних и убыванию уровня остальных спутников в спектре. Именно такой механизм влияния зондирующего сигнала на спектр накачки является доминирующим в рассмотренном случае.

Следует отметить, что при возбуждении входной антенной 1 двух ПМСВ с частотами f_p и f_z в спектре выходного сигнала могут появляться комбинационные частоты $m_1 f_p \pm m_2 f_z$, $m_{1,2} = 0, 1, 2, \dots$ [36, 37]. В нашем случае разностная частота $\Delta F = f_p - f_z \approx 33.92$ МГц и можно ожидать, что наиболее значимые уровни сигнала будут иметь комбинационные частоты $F_1 = f_p + \Delta F \approx 3.04413$ ГГц и $F_2 = f_z - \Delta F \approx 2.94308$ ГГц. Эти частоты достаточно близки к наблюдаемым с выхода 2 спутникам $f_s \approx 2.943$ ГГц и $f_s \approx 3.04413$ ГГц. Однако спутник на частоте $f_s \approx 3.04413$ ГГц наблюдается в спектре накачки при $C_p > 3$ дБ и в отсутствие зондирующего сигнала. Спутник на частоте $f_s \approx 2.943$ ГГц возникает только если частота зондирующего сигнала лежит в интервале $2.9755 \text{ ГГц} \leq f_z \leq 2.9795 \text{ ГГц}$. Эти особенности не могут быть объяснены механизмом формирования комбинационных частот.

Заключение

Таким образом, исследованы особенности формирования спектров выходных сигналов СВ четырехпортовой крестовидной структуры на основе пленки железиттриевого граната при возбуждении входной антенной одновременно двух поверхностных магнитостатических волн, где первая с частотой f_p и мощностью P_p выше порога параметрической неустойчивости первого порядка P_{th} ($P_p > P_{th}$) является накачкой, а вторая с частотой $f_z \neq f_p$ и $P_z \approx P_{th}$ – зондирующая. Обнаружено, что выбором частоты зондирующего сигнала можно существенно (на 10 дБ) менять на выходных антеннах относительные уровни сигнала волн-спутников, которые являются вторичными поверхностными магнитостатическими волнами с частотами $f_s \neq f_p, f_z$ и появляются в спектре выходных сигналов в результате беспороговых процессов слияния параметрических спиновых волн, рождаемых поверхностными магнитостатическими волнами накачки. При этом на выходных антеннах, расположенных на ортогональных волноводах, частоты f_s могут различаться. Обнаруженный эффект связывается с изменением заселенности параметрическими спиновыми волнами спектра СВ мультипортовой структуры под влиянием зондирующего сигнала, а также с наличием у структуры фильтрующих свойств и эффектами невязимного распространения СВ в касательно намагниченных волноводах.

Список литературы

1. Mahmoud A., Ciubotaru F., Vanderveken F., Chumak A. V., Hamdioui S., Adelman C., Cotofana S. Introduction to spin wave computing // J. Appl. Phys. 2020. Vol. 128, no. 16. P. 161101. DOI: 10.1063/5.0019328.
2. Bernstein K., Cavin R. K., Porod W., Seabaugh A., Welser J. Device and architecture outlook for beyond CMOS switches // Proc. IEEE. 2010. Vol. 98, no. 12. P. 2169–2184. DOI: 10.1109/JPROC.2010.2066530.
3. Nikonov D. E., Young I. A. Overview of beyond-CMOS devices and a uniform methodology for their benchmarking // Proc. IEEE. 2013. Vol. 101, no. 12. P. 2498–2533. DOI: 10.1109/JPROC.2013.2252317.
4. Roy K., Bandyopadhyay S., Atulasimha J. Hybrid spintronics and straintronics: A magnetic

- technology for ultra low energy computing and signal processing // Appl. Phys. Lett. 2011. Vol. 99, no. 6. P. 063108. DOI: 10.1063/1.3624900.
5. *Chumak A. V., Vasyuchka V. K., Serga A. A., Hillebrands B.* Magnon spintronics // Nature Physics. 2015. Vol. 11, no. 6. P. 453–461. DOI: 10.138/NPHYS3347.
 6. *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. DOI: 10.3367/UFNr.0185.201510m.1099.
 7. *Khitun A., Wang K. L.* Non-volatile magnonic logic circuits engineering // J. Appl. Phys. 2011. Vol. 110, no. 3. P. 034306. DOI: 10.1063/1.3609062.
 8. *Khitun A.* Magnonic holographic devices for special type data processing // J. Appl. Phys. 2013. Vol. 113, no. 16. P. 164503. DOI: 10.1063/1.4802656.
 9. *Хитун А. Г., Кожанов А. Е.* Приборы магнонной логики // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Физика. 2017. Т. 17, № 4. С. 216–241. DOI: 10.18500/1817-3020-2017-17-4-216-241.
 10. *Nanayakkara K., Anferov A., Jacob A. P., Allen S. J., Kozhanov A.* Cross junction spin wave logic architecture // IEEE Trans. Magn. 2014. Vol. 50, no. 11. P. 3402204. DOI: 10.1109/TMAG.2014.2320632.
 11. *Kozhevnikov A., Gertz F., Dudko G., Filimonov Y., Khitun A.* Pattern recognition with magnonic holographic memory device // Appl. Phys. Lett. 2015. Vol. 106, no. 14. P. 142409. DOI: 10.1063/1.4917507.
 12. *Balynsky M., Gutierrez D., Chiang H., Kozhevnikov A., Dudko G., Filimonov Y., Balandin A. A., Khitun A.* A magnetometer based on a spin wave interferometer // Sci. Rep. 2017. Vol. 7, no. 1. P. 11539. DOI: 10.1038/s41598-017-11881-y.
 13. *Au Y., Davison T., Ahmad E., Keatley P. S., Hicken R. J., Kruglyak V. V.* Excitation of propagating spin waves with global uniform microwave fields // Appl. Phys. Lett. 2011. Vol. 98, no. 12. P. 122506. DOI: 10.1063/1.3571444.
 14. *Brächer T., Pirro P., Westermann J., Sebastian T., Lägél B., Van de Wiele B., Vansteenkiste A., Hillebrands B.* Generation of propagating backward volume spin waves by phase-sensitive mode conversion in two-dimensional microstructures // Appl. Phys. Lett. 2013. Vol. 102, no. 13. P. 132411. DOI: 10.1063/1.4800005.
 15. *Davies C. S., Francis A., Sadovnikov A. V., Chertopalov S. V., Bryan M. T., Grishin S. V., Allwood D. A., Sharaevskii Y. P., Nikitov S. A., Kruglyak V. V.* Towards graded-index magnonics: Steering spin waves in magnonic networks // Phys. Rev. B. 2015. Vol. 92, no. 2. P. 020408. DOI: 10.1103/PhysRevB.92.020408.
 16. *Sadovnikov A. V., Davies C. S., Grishin S. V., Kruglyak V. V., Romanenko D. V., Sharaevskii Y. P., Nikitov S. A.* Magnonic beam splitter: The building block of parallel magnonic circuitry // Appl. Phys. Lett. 2015. Vol. 106, no. 19. P. 192406. DOI: 10.1063/1.4921206.
 17. *Demidov V. E., Demokritov S. O., Birt D., O’Gorman B., Tsoi M., Li X.* Radiation of spin waves from the open end of a microscopic magnetic-film waveguide // Phys. Rev. B. 2009. Vol. 80, no. 1. P. 014429. DOI: 10.1103/PhysRevB.80.014429.
 18. *Дудко Г. М., Кожевников А. В., Хивинцев Ю. В., Филимонов Ю. А., Хитун А. Г., Никитов С. А.* Микромагнитное моделирование распространения спиновых волн в касательно намагниченных крестах на основе ферритовых микроволноводов различной ширины // Радиотехника и электроника. 2018. Т. 63, № 10. С. 1105–1109. DOI: 10.1134/S0033849418100091.
 19. *Хивинцев Ю. В., Кожевников А. В., Сахаров В. К., Дудко Г. М., Филимонов Ю. А., Хитун А.* Интерференция спиновых волн в решетках из микроволноводов на основе пленок железо-иттриевого граната // ЖТФ. 2019. Т. 89, № 11. С. 1712–1718. DOI: 10.21883/JTF.2019.11.48333.118-19.

Кожевников А. В., Дудко Г. М., Хивинцев Ю. В., Сахаров В. К., Высоцкий С. Л., Никулин Ю. В., Селезнев М. Е., Хитун А. Г., Филимонов Ю. А.

20. Khivintsev Y. V., Kozhevnikov A. V., Dudko G. M., Sakharov V. K., Filimonov Y. A., Khitun A. G. Spin waves in YIG-based networks: Logic and signal processing // *Phys. Metals Metallogr.* 2019. Vol. 120, no. 13. P. 1318–1324. DOI: 10.1134/S0031918X1913012X.
21. Gertz F., Kozhevnikov A. V., Filimonov Y. A., Nikonov D. E., Khitun A. Magnonic holographic memory: From proposal to device // *IEEE Journal on Exploratory Solid-State Computational Devices and Circuits.* 2015. Vol. 1. P. 67–75. DOI: 10.1109/JXCDC.2015.2461618.
22. Khivintsev Y., Ranjbar M., Gutierrez D., Chiang H., Kozhevnikov A., Filimonov Y., Khitun A. Prime factorization using magnonic holographic devices // *J. Appl. Phys.* 2016. Vol. 120, no. 12. P. 123901. DOI: 10.1063/1.4962740.
23. Balynsky M., Kozhevnikov A., Khivintsev Y., Bhowmick T., Gutierrez D., Chiang H., Dudko G., Filimonov Y., Liu G., Jiang C., Balandin A. A., Lake R., Khitun A. Magnonic interferometric switch for multi-valued logic circuits // *J. Appl. Phys.* 2017. Vol. 121, no. 2. P. 024504. DOI: 10.1063/1.4973115.
24. Balynskiy M., Chiang H., Gutierrez D., Kozhevnikov A., Filimonov Y., Khitun A. Reversible magnetic logic gates based on spin wave interference // *J. Appl. Phys.* 2018. Vol. 123, no. 14. P. 144501. DOI: 10.1063/1.5011772.
25. Balinskiy M., Chiang H., Kozhevnikov A., Filimonov Y., Balandin A. A., Khitun A. A spin-wave magnetometer with a positive feedback // *J. Magn. Magn. Mater.* 2020. Vol. 514. P. 167046. DOI: 10.1016/j.jmmm.2020.167046.
26. Gutierrez D., Chiang H., Bhowmick T., Volodchenkov A. D., Ranjbar M., Liu G., Jiang C., Warren C., Khivintsev Y., Filimonov Y., Garay J., Lake R., Balandin A. A., Khitun A. Magnonic holographic imaging of magnetic microstructures // *J. Magn. Magn. Mater.* 2017. Vol. 428. P. 348–356. DOI: 10.1016/j.jmmm.2016.12.022.
27. Chumak A. V., Serga A. A., Hillebrands B. Magnon transistor for all-magnon data processing // *Nature Communications.* 2014. Vol. 5, no. 1. P. 4700. DOI: 10.1038/ncomms5700.
28. Ustinov A. B., Kalinikos B. A. The power-dependent switching of microwave signals in a ferrite-film nonlinear directional coupler // *Appl. Phys. Lett.* 2006. Vol. 89, no. 17. P. 172511. DOI: 10.1063/1.2362576.
29. Sadovnikov A. V., Beginin E. N., Morozova M. A., Sharaevskii Y. P., Grishin S. V., Sheshukova S. E., Nikitov S. A. Nonlinear spin wave coupling in adjacent magnonic crystals // *Appl. Phys. Lett.* 2016. Vol. 109, no. 4. P. 042407. DOI: 10.1063/1.4960195.
30. Sadovnikov A. V., Odintsov S. A., Beginin E. N., Sheshukova S. E., Sharaevskii Y. P., Nikitov S. A. Toward nonlinear magnonics: Intensity-dependent spin-wave switching in insulating side-coupled magnetic stripes // *Phys. Rev. B.* 2017. Vol. 96, no. 14. P. 144428. DOI: 10.1103/PhysRevB.96.144428.
31. Brächer T., Pirro P. An analog magnon adder for all-magnonic neurons // *J. Appl. Phys.* 2018. Vol. 124, no. 15. P. 152119. DOI: 10.1063/1.5042417.
32. Wang Q., Kewenig M., Schneider M., Verba R., Kohl F., Heinz B., Geilen M., Mohseni M., Lägél B., Ciubotaru F., Adelman C., Dubs C., Cotozana S. D., Dobrovolskiy O. V., Brächer T., Pirro P., Chumak A. V. A magnonic directional coupler for integrated magnonic half-adders // *Nature Electronics.* 2020. Vol. 3, no. 12. P. 765–774. DOI: 10.1038/s41928-020-00485-6.
33. Nakane R., Tanaka G., Hirose A. Reservoir computing with spin waves excited in a garnet film // *IEEE Access.* 2018. Vol. 6. P. 4462–4469. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2794584.
34. Кожевников А. В., Хивинцев Ю. В., Сахаров В. К., Дудко Г. М., Высоцкий С. Л., Никулин Ю. В., Павлов Е. С., Филимонов Ю. А., Хитун А. Г. Влияние параметрических процессов на распространение спиновых волн в крестовидных структурах на основе волноводов из пленок железиттриевого граната // *Известия вузов. ПНД.* 2019. Т. 27, № 3. С. 9–32. DOI: 10.18500/0869-6632-2019-27-3-9-32.
35. Кожевников А. В., Дудко Г. М., Хивинцев Ю. В., Сахаров В. К., Высоцкий С. Л., Никулин Ю. В., Павлов Е. С., Хитун А. Г., Филимонов Ю. А. Влияние направления магнитного поля на

спектр выходных сигналов спиновых волн при трехмагнонном распаде поверхностных магнитостатических волн в кресте на основе волноводов из пленки железо-иттриевого граната // Известия вузов. ПНД. 2020. Т. 28, № 2. С. 168–185.
DOI: 10.18500/0869-6632-2020-28-2-168-185.

36. Гуревич А. Г., Мелков Г. А. Магнитные колебания и волны. М.: ФИЗМАТЛИТ, 1994. 464 с.
37. Ваиковский А. В., Стальмахов В. С., Шараевский Ю. П. Магнитостатические волны в электронике сверхвысоких частот. Саратов: Издательство Саратовского университета, 1993. 312 с.
38. Медников А. М. Нелинейные эффекты при распространении поверхностных спиновых волн в пленках ЖИГ // ФТТ. 1981. Т. 23, № 1. С. 242–245.
39. Дудко Г. М., Хивинцев Ю. В., Сахаров В. К., Кожевников А. В., Высоцкий С. Л., Селезнев М. Е., Филимонов Ю. А., Хитун А. Г. Микромагнитное моделирование нелинейного взаимодействия латеральных магнитостатических мод в крестовидных структурах на основе волноводов из пленок железоиттриевого граната // Известия вузов. ПНД. 2019. Т. 27, № 2. С. 39–60. DOI: 10.18500/0869-6632-2019-27-2-39-60.
40. Темирязов А. Г. Механизм преобразования поверхностной магнитостатической волны в условиях трехмагнонного распада // ФТТ. 1987. Т. 29, № 2. С. 313–319.
41. Казаков Г. Т., Кожевников А. В., Филимонов Ю. А. Влияние параметрически возбужденных спиновых волн на дисперсию и затухание поверхностных магнитостатических волн в ферритовых пленках // ЖЭТФ. 1999. Т. 115, № 1. С. 318–332. DOI: 10.1134/1.558780.
42. Казаков Г. Т., Кожевников А. В., Филимонов Ю. А. Стимуляция трехмагнонного распада магнитостатических волн дополнительной локальной накачкой // Письма в ЖТФ. 1995. Т. 21, № 14. С. 47–52.

References

1. Mahmoud A, Ciubotaru F, Vanderveken F, Chumak AV, Hamdioui S, Adelmann C, Cotofana S. Introduction to spin wave computing. J. Appl. Phys. 2020;128(16):161101. DOI: 10.1063/5.0019328.
2. Bernstein K, Cavin RK, Porod W, Seabaugh A, Welser J. Device and architecture outlook for beyond CMOS switches. Proc. IEEE. 2010;98(12):2169–2184. DOI: 10.1109/JPROC.2010.2066530.
3. Nikonov DE, Young IA. Overview of beyond-CMOS devices and a uniform methodology for their benchmarking. Proc. IEEE. 2013;101(12):2498–2533. DOI: 10.1109/JPROC.2013.2252317.
4. Roy K, Bandyopadhyay S, Atulasimha J. Hybrid spintronics and straintronics: A magnetic technology for ultra low energy computing and signal processing. Appl. Phys. Lett. 2011;99(6):063108. DOI: 10.1063/1.3624900.
5. Chumak AV, Vasyuchka VK, Serga AA, Hillebrands B. Magnon spintronics. Nature Physics. 2015;11(6):453–461. DOI: 10.1038/NPHYS3347.
6. Nikitov SA, Kalyabin DV, Lisenkov IV, Slavin AN, Barabanenkov YN, Osokin SA, Sadovnikov AV, Baginin EN, Morozova MA, Sharaevskii YP, Filimonov YA, Khivintsev YV, Vysotsky SL, Sakharov VK, Pavlov ES. Magnonics: A new research area in spintronics and spin wave electronics. Phys. Usp. 2015;58(10):1002–1028. DOI: 10.3367/UFNr.0185.201510m.1099.
7. Khitun A, Wang KL. Non-volatile magnonic logic circuits engineering. J. Appl. Phys. 2011;110(3):0343061. DOI: 10.1063/1.3609062.
8. Khitun A. Magnonic holographic devices for special type data processing. J. Appl. Phys. 2013;113(16):164503. DOI: 10.1063/1.4802656.
9. Khitun AG, Kozhanov AE. Magnonic logic devices. Izvestiya of Saratov University. Physics. 2017;17(4):216–241 (in Russian). DOI: 10.18500/1817-3020-2017-17-4-216-241.
10. Nanayakkara K, Anferov A, Jacob AP, Allen SJ, Kozhanov A. Cross junction spin wave logic architecture. IEEE Trans. Magn. 2014;50(11):3402204. DOI: 10.1109/TMAG.2014.2320632.

*Кожевников А. В., Дудко Г. М., Хивинцев Ю. В., Сахаров В. К., Высоцкий С. Л.,
Никитин Ю. В., Селезнев М. Е., Хитун А. Г., Филимонов Ю. А.*

11. Kozhevnikov A, Gertz F, Dudko G, Filimonov Y, Khitun A. Pattern recognition with magnonic holographic memory device. *Appl. Phys. Lett.* 2015;106(14):142409. DOI: 10.1063/1.4917507.
12. Balynsky M, Gutierrez D, Chiang H, Kozhevnikov A, Dudko G, Filimonov Y, Balandin AA, Khitun A. A magnetometer based on a spin wave interferometer. *Sci. Rep.* 2017;7(1):11539. DOI: 10.1038/s41598-017-11881-y.
13. Au Y, Davison T, Ahmad E, Keatley PS, Hicken RJ, Kruglyak VV. Excitation of propagating spin waves with global uniform microwave fields. *Appl. Phys. Lett.* 2011;98(12):122506. DOI: 10.1063/1.3571444.
14. Brächer T, Pirro P, Westermann J, Sebastian T, Lägler B, Van de Wiele B, Vansteenkiste A, Hillebrands B. Generation of propagating backward volume spin waves by phase-sensitive mode conversion in two-dimensional microstructures. *Appl. Phys. Lett.* 2013;102(13):132411. DOI: 10.1063/1.4800005.
15. Davies CS, Francis A, Sadovnikov AV, Chertopalov SV, Bryan MT, Grishin SV, Allwood DA, Sharaevskii YP, Nikitov SA, Kruglyak VV. Towards graded-index magnonics: Steering spin waves in magnonic networks. *Phys. Rev. B.* 2015;92(2):020408. DOI: 10.1103/PhysRevB.92.020408.
16. Sadovnikov AV, Davies CS, Grishin SV, Kruglyak VV, Romanenko DV, Sharaevskii YP, Nikitov SA. Magnonic beam splitter: The building block of parallel magnonic circuitry. *Appl. Phys. Lett.* 2015;106(19):192406. DOI: 10.1063/1.4921206.
17. Demidov VE, Demokritov SO, Birt D, O’Gorman B, Tsoi M, Li X. Radiation of spin waves from the open end of a microscopic magnetic-film waveguide. *Phys. Rev. B.* 2009;80(1):014429. DOI: 10.1103/PhysRevB.80.014429.
18. Dudko GM, Kozhevnikov AV, Khivintsev YV, Filimonov YA, Khitun AG, Nikitov SA. Micro-magnetic simulation of propagation of spin waves in in-plane magnetized crosses based on ferrite microwaveguides of different width. *J. Commun. Technol. Electron.* 2018;63(10):1212–1216. DOI: 10.1134/S1064226918100091.
19. Khivintsev YV, Kozhevnikov AV, Sakharov VK, Dudko GM, Filimonov YA, Khitun A. Interference of spin waves in arrays of microwaveguides based on yttrium-iron garnet films. *Tech. Phys.* 2019;64(11):1622–1628. DOI: 10.1134/S106378421911015X.
20. Khivintsev YV, Kozhevnikov AV, Dudko GM, Sakharov VK, Filimonov YA, Khitun AG. Spin waves in YIG-based networks: Logic and signal processing. *Phys. Metals Metallogr.* 2019; 120(13):1318–1324. DOI: 10.1134/S0031918X1913012X.
21. Gertz F, Kozhevnikov AV, Filimonov YA, Nikonov DE, Khitun A. Magnonic holographic memory: From proposal to device. *IEEE Journal on Exploratory Solid-State Computational Devices and Circuits.* 2015;1:67–75. DOI: 10.1109/JXCDC.2015.2461618.
22. Khivintsev Y, Ranjbar M, Gutierrez D, Chiang H, Kozhevnikov A, Filimonov Y, Khitun A. Prime factorization using magnonic holographic devices. *J. Appl. Phys.* 2016;120(12):123901. DOI: 10.1063/1.4962740.
23. Balynsky M, Kozhevnikov A, Khivintsev Y, Bhowmick T, Gutierrez D, Chiang H, Dudko G, Filimonov Y, Liu G, Jiang C, Balandin AA, Lake R, Khitun A. Magnonic interferometric switch for multi-valued logic circuits. *J. Appl. Phys.* 2017;121(2):024504. DOI: 10.1063/1.4973115.
24. Balynskiy M, Chiang H, Gutierrez D, Kozhevnikov A, Filimonov Y, Khitun A. Reversible magnetic logic gates based on spin wave interference. *J. Appl. Phys.* 2018;123(14):144501. DOI: 10.1063/1.5011772.
25. Balinskiy M, Chiang H, Kozhevnikov A, Filimonov Y, Balandin AA, Khitun A. A spin-wave magnetometer with a positive feedback. *J. Magn. Magn. Mater.* 2020;514:167046. DOI: 10.1016/j.jmmm.2020.167046.
26. Gutierrez D, Chiang H, Bhowmick T, Volodchenkov AD, Ranjbar M, Liu G, Jiang C, Warren C,

- Khivintsev Y, Filimonov Y, Garay J, Lake R, Balandin AA, Khitun A. Magnonic holographic imaging of magnetic microstructures. *J. Magn. Magn. Mater.* 2017;428:348–356. DOI: 10.1016/j.jmmm.2016.12.022.
27. Chumak AV, Serga AA, Hillebrands B. Magnon transistor for all-magnon data processing. *Nature Communications.* 2014;5(1):4700. DOI: 10.1038/ncomms5700.
 28. Ustinov AB, Kalinikos BA. The power-dependent switching of microwave signals in a ferrite-film nonlinear directional coupler. *Appl. Phys. Lett.* 2006;89(17):172511. DOI: 10.1063/1.2362576.
 29. Sadovnikov AV, Beginin EN, Morozova MA, Sharaevskii YP, Grishin SV, Sheshukova SE, Nikitov SA. Nonlinear spin wave coupling in adjacent magnonic crystals. *Appl. Phys. Lett.* 2016;109(4):042407. DOI: 10.1063/1.4960195.
 30. Sadovnikov AV, Odintsov SA, Beginin EN, Sheshukova SE, Sharaevskii YP, Nikitov SA. Toward nonlinear magnonics: Intensity-dependent spin-wave switching in insulating side-coupled magnetic stripes. *Phys. Rev. B.* 2017;96(14):144428. DOI: 10.1103/PhysRevB.96.144428.
 31. Brächer T, Pirro P. An analog magnon adder for all-magnonic neurons. *J. Appl. Phys.* 2018;124(15):152119. DOI: 10.1063/1.5042417.
 32. Wang Q, Kewenig M, Schneider M, Verba R, Kohl F, Heinz B, Geilen M, Mohseni M, Lägél B, Ciubotaru F, Adelmann C, Dubs C, Cotofana SD, Dobrovolskiy OV, Brächer T, Pirro P, Chumak AV. A magnonic directional coupler for integrated magnonic half-adders. *Nature Electronics.* 2020;3(12):765–774. DOI: 10.1038/s41928-020-00485-6.
 33. Nakane R, Tanaka G, Hirose A. Reservoir computing with spin waves excited in a garnet film. *IEEE Access.* 2018;6:4462–4469. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2794584.
 34. Kozhevnikov AV, Khivintsev YV, Sakharov VK, Dudko GM, Vysotskii SL, Nikulin YV, Pavlov ES, Filimonov YA, Khitun AG. The effect of parametric processes on the propagation of spin waves in cross-shaped structures based on waveguides from yttrium iron garnet films. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics.* 2019;27(3):9–32 (in Russian). DOI: 10.18500/0869-6632-2019-27-3-9-32.
 35. Kozhevnikov AV, Dudko GM, Khivintsev YV, Sakharov VK, Vysotskii SL, Nikulin YV, Pavlov ES, Khitun AG, Filimonov YA. Magnetic field direction influence on the spectrum of spin waves output signals at three-magnon decay of magnetostatic surface waves in a cross based on waveguides of yttrium iron garnet film. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics.* 2020;28(2):168–185 (in Russian). DOI: 10.18500/0869-6632-2020-28-2-168-185.
 36. Gurevich AG, Melkov GA. *Magnetization Oscillations and Waves.* Boca Raton: CRC Press; 1996. 464 p.
 37. Vashkovskiy AV, Stal'makhov VS, Sharaevskii YP. *Magnetostatic Waves in Microwave Electronics.* Saratov: Saratov State University Publishing House; 1993. 312 p. (in Russian).
 38. Mednikov AM. Nonlinear effects in the propagation of surface spin waves in YIG-films. *Sov. Phys. Solid State.* 1981;23(1):242–245 (in Russian).
 39. Dudko GM, Khivintsev YV, Sakharov VK, Kozhevnikov AV, Vysotskii SL, Seleznev ME, Filimonov YA, Khitun AG. Micromagnetic modeling of nonlinear interaction of lateral magnetostatic modes in cross-shaped structures based on waveguides from iron yttrium garnet films. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics.* 2019;27(2):39–60 (in Russian). DOI: 10.18500/0869-6632-2019-27-2-39-60.
 40. Temiryazev AG. Mechanism of surface magnetostatic wave frequency conversion under three-magnon decay conditions. *Sov. Phys. Solid State.* 1987;29(2):313–319 (in Russian).
 41. Kazakov GT, Kozhevnikov AV, Filimonov YA. The effect of parametrically excited spin waves on the dispersion and damping of magnetostatic surface waves in ferrite films. *J. Exp. Theor. Phys.* 1999;88(1):174–181. DOI: 10.1134/1.558780.
 42. Kazakov GT, Kozhevnikov AV, Filimonov YA. Stimulation of tree-magnon decay of magnetostatic waves by additional pumping. *Tech. Phys. Lett.* 1995;21(7):558–560.

*Кожевников А. В., Дудко Г. М., Хивинцев Ю. В., Сахаров В. К., Высоцкий С. Л.,
Никитин Ю. В., Селезнев М. Е., Хитун А. Г., Филимонов Ю. А.*



Кожевников Александр Владимирович – родился в Саратове (1962), окончил Саратовский государственный университет (1984). Работает в Саратовском филиале ИРЭ РАН старшим научным сотрудником. Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук в СГУ (2011) в области нелинейных спиновых волн. Опубликовал 23 научных статьи.

410019 Россия, Саратов, ул. Зеленая, 38
Саратовский филиал Института радиотехники и электроники
им. В. А. Котельникова РАН
E-mail: kzhavl@gmail.com
ORCID: 0000-0002-8904-475X



Дудко Галина Михайловна – родилась в Свердловске (1961). Окончила физический факультет Саратовского университета им. Н.Г. Чернышевского (1983). Кандидат физико-математических наук (2002). Область научных интересов: нелинейная динамика магнитостатических волн, микромагнитное моделирование динамики намагниченности в ферромагнитных нано- и микроструктурах. Имеет более 30 научных публикаций.

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



Хивинцев Юрий Владимирович – родился в 1975 году. Окончил физический факультет Саратовского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского (1998). Кандидат физико-математических наук (2004). Ведущий научный сотрудник лаборатории магнитоэлектроники Саратовского филиала Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН и доцент Саратовского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского. Область научных интересов – магнитные колебания и волны, СВЧ-электроника.

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



Сахаров Валентин Константинович – родился в пос. Соколовый Саратовской области (1986). Окончил Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского (2008, кафедра физики полупроводников) и аспирантуру Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН (2011). В настоящее время работает научным сотрудником лаборатории магнитоэлектроники СВЧ Саратовского филиала Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН. Область научных интересов: спин-волновые явления в магнитных микро- и наноструктурах, СВЧ-электроника. Имеет 17 научных публикаций.

410019 Россия, Саратов, ул. Зеленая, 38
Саратовский филиал Института радиотехники и электроники
им. В. А. Котельникова РАН
E-mail: valentin@sakharov.info



Высоцкий Сергей Львович – родился в Саратове (1955), окончил Саратовский политехнический институт (1977). Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук в области радиофизики (СГУ, 1994). Ведущий научный сотрудник лаборатории магнитоэлектроники Саратовского филиала ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН. Автор более 60 научных работ.

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



Никулин Юрий Васильевич – родился в Саратове (1982), окончил Саратовский государственный университет (2004). После окончания СГУ работает в СФИРЭ им. В. А. Котельникова РАН старшим научным сотрудником. Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук в области физической электроники и материаловедения (СГУ, 2014). Опубликовал 28 научных статей по направлениям, указанным выше.

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



Селезнев Михаил Евгеньевич – родился в г. Заречный (1994), окончил факультет нано- и биомедицинских технологий (2017). Инженер Саратовского филиала ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, аспирант СНИГУ ФНБМТ. Профессиональные интересы: магнетика и спинтроника, магнитные материалы, физика полупроводников, физика твердого тела. Имеет 3 публикации.

410019 Россия, Саратов, ул. Зеленая, 38
Саратовский филиал Института радиотехники и электроники
им. В. А. Котельникова РАН
E-mail: mixanich94@mail.ru



Хитун Александр Георгиевич – родился в Таганроге (1968), окончил Московский физико-технический институт (МФТИ, 1991). После окончания МФТИ работал в ИОФАН в центре волоконной оптики Е. М. Дианова. Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук в области металло-покрытых оптических волноводов (МФТИ, 1995). В 1999 начал работу в Университете Калифорнии в Лос Анджелесе в области наноэлектроники. С 2011 года работает в Университете Калифорнии в Риверсайде. Автор первых работ по спин-волновой логике. Отмечен наградами Корпорации Полупроводниковых Исследований в области микроэлектроники (MARCO, 2006 и 2008). Работа доктора Хитуна «Магнетонная голографическая память на спиновых волнах» была признана «The Physics World» одним из 10 прорывов 2014 года. Опубликовал более 100 научных статей в научных журналах, 6 глав в книгах, 7 патентов США.

900 University Ave., WCH 414, Riverside, CA, USA, 90815
Университет Калифорнии, Риверсайд
E-mail: akhitun@engr.ucr.edu



Филимонов Юрий Александрович – родился в Куйбышеве (1955). Окончил факультет физической и квантовой электроники МФТИ (1979). Д.ф.-м.н. (2008), профессор по специальности «Физика магнитных явлений» (2012). Директор Саратовского филиала ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН. Профессиональные интересы: магнетика и спинтроника, магнитные материалы и структуры, электронная компонентная база. Имеет более 120 публикаций.

410019 Россия, Саратов, ул. Зеленая, 38
Саратовский филиал Института радиотехники и электроники
им. В. А. Котельникова РАН
E-mail: fil@soire.renet.ru
ORCID: 0000-0002-2645-6669
AuthorID: 18696

*Кожевников А. В., Дудко Г. М., Хивинцев Ю. В., Сахаров В. К., Высоцкий С. Л.,
Никулин Ю. В., Селезнев М. Е., Хитун А. Г., Филимонов Ю. А.*
Известия вузов. ПНД, 2021, т. 29, № 5