

Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2023. Т. 31, № 2
Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Applied Nonlinear Dynamics. 2023;31(2)

Научная статья
УДК 537.86

DOI: 10.18500/0869-6632-003032
EDN: JYXDDE

Влияние параметрической неустойчивости на спиновую накачку дипольно-обменными поверхностными магнитостатическими волнами в структурах ЖИГ–Pt

М. Е. Селезнёв¹, Ю. В. Никулин^{1,2}, Ю. В. Хивинцев^{1,2}, С. Л. Высоцкий^{1,2},
А. В. Кожевников¹, В. К. Сахаров^{1,2}, Г. М. Дудко¹, 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

E-mail: mixanich94@mail.ru, yvnikulin@gmail.com, khivintsev@gmail.com, vysotsl@gmail.com,
kzhavl@gmail.com, valentin@sakharov.info, dugal_2010@hotmail.com, ✉yuri.a.filimonov@gmail.com

Поступила в редакцию 13.12.2022, принята к публикации 3.02.2023,

опубликована онлайн 20.03.2023, опубликована 31.03.2023

Аннотация. Цель работы – с помощью обратного спинового эффекта Холла экспериментально исследовать влияние четырехмагнотной параметрической неустойчивости на спиновую накачку дипольно-обменными поверхностными магнитостатическими волнами в структурах на основе пленок железоиттриевого граната (ЖИГ) и платины (Pt). **Методы.** Эксперименты выполнялись с макетом линии задержки на основе структуры ЖИГ/Pt, в котором ЭДС (U), индуцированная за счет обратного спинового эффекта Холла, демонстрирует рост на частотах резонансного взаимодействия дипольной поверхностной магнитостатической волны с объемными обменными модами. Исследовались амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики макета линии задержки, а также частотная зависимость сигнала ЭДС ($U(f)$) с платины в зависимости от мощности поверхностной магнитостатической волны. **Результаты.** Показано, что резонансный рост ЭДС на частотах дипольно-обменных резонансов обусловлен наличием на таких частотах сингулярностей ван Хофа в плотности состояний спиновых волн, что приводит к росту эффективности электрон-магнотного рассеяния на интерфейсе ЖИГ–Pt. Рост мощности поверхностных магнитостатических волн за порогом развития четырехмагнотной неустойчивости приводит к «сглаживанию» резонансных особенностей в частотной зависимости ЭДС $U(f)$, что объясняется снижением эффективности спиновой накачки из-за разрушения дипольно-обменных резонансов и связанных с ними сингулярностей в плотности состояний спиновых волн. **Заключение.** Полученные результаты могут представлять интерес для разработки высокочувствительных детекторов спинового тока, а также для создания устройств спинтроники.

Ключевые слова: параметрические спиновые волны, спиновая накачка, структуры ЖИГ–Pt, электрон-магнотное рассеяние, сингулярности ван Хофа.

Благодарности. Работа поддержана грантом РФФ № 22-19-00500.

Для цитирования: Селезнёв М. Е., Никулин Ю. В., Хивинцев Ю. В., Высоцкий С. Л., Кожевников А. В., Сахаров В. К., Дудко Г. М., Филимонов Ю. А. Влияние параметрической неустойчивости на спиновую накачку дипольно-обменными поверхностными магнитостатическими волнами в структурах ЖИГ–Pt // Известия вузов. ПНД. 2023. Т. 31, № 2. С. 225–242. DOI: 10.18500/0869-6632-003032

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

Influence of parametric instability on spin pumping by dipole-exchange magnetostatic surface waves in YIG–Pt structures

*M. E. Seleznev*¹, *Y. V. Nikulin*^{1,2}, *Y. V. Khivintsev*^{1,2}, *S. L. Vysotskii*^{1,2},
*A. V. Kozhevnikov*¹, *V. K. Sakharov*^{1,2}, *G. M. Dudko*¹, *Y. A. Filimonov*^{1,2}✉

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

²Saratov State University, Russia

E-mail: mixanich94@mail.ru, yvnikulin@gmail.com, khivintsev@gmail.com, vysotsl@gmail.com,
kzhavl@gmail.com, valentin@sakharov.info, dugal_2010@hotmail.com, ✉yuri.a.filimonov@gmail.com

Received 13.12.2022, accepted 3.02.2023, available online 20.03.2023, published 31.03.2023

Abstract. The purpose of this work is to study the influence of four-magnon (4M) parametric instability on spin pumping by dipole-exchange magnetostatic surface waves (MSSW) with the help of the inverse spin Hall effect (ISHE) in structures based on yttrium-iron garnet (YIG) and platinum (Pt). *Methods.* The experiments were carried out using the delay line structures based on YIG(900 nm)/Pt(9 nm) where electromotive force (EMF) induced by ISHE demonstrates a growth at the frequencies of the resonant interaction between MSSW and volume exchange modes. The frequency dependencies of the amplitude and phase for the delay line structure and EMF ($U(f)$) from the platinum layer were studied as a function of the MSSW power. *Results.* It was shown that the resonant EMF growth at the frequencies of dipole-exchange resonances is caused by the presence of Van Hove singularities in the density of states for spin waves at such frequencies that leads to an increase in the efficiency of electron-magnon scattering at the YIG–Pt interface. A growth in MSSW power beyond the threshold of 4M instability development results in a “smoothing” of resonant particularities in the EMF frequency dependence $U(f)$ that can be explained by decreasing efficiency of spin pumping due to destruction of dipole-exchange resonances and related singularities in the density of states of spin waves. *Conclusion.* Obtained results may be of interest for the development of highly sensitive spin current detectors, as well as for the implementation of spintronic devices.

Keywords: parametric spin waves, spin pumping, YIG–Pt structures, electron-magnon decay, Van Hove singularities.

Acknowledgements. The work was supported by RSF grant No. 22-19-00500.

For citation: Seleznev ME, Nikulin YV, Khivintsev YV, Vysotskii SL, Kozhevnikov AV, Sakharov VK, Dudko GM, Filimonov YA. Influence of parametric instability on spin pumping by dipole-exchange magnetostatic surface waves in YIG–Pt structures. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics.* 2023;31(2):225–242. DOI: 10.18500/0869-6632-003032

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

Введение

Генерация и обнаружение спиновых токов в гетероструктурах на основе пленок железоиттриевого граната (ЖИГ) и платины (Pt) привлекают большое внимание как в фундаментальной, так и в прикладной спинтронике [1–4]. Спиновые токи в таких гетероструктурах генерируются с помощью спиновой накачки когерентными [5–9] или некогерентными (тепловыми [10, 11] или параметрическими [12–15]) спиновыми волнами (СВ). Плотность инжектируемого в пленку Pt спинового тока J_S определяется процессами электрон-магнонного рассеяния на границе ЖИГ/Pt [16]. Для обнаружения инжектируемого в платину спинового тока широко используется обратный спиновый эффект Холла (ОСЭХ) [17, 18], который преобразует спиновый ток J_S в электрический

$$J_c \sim |J_S| \cdot [\vec{n} \times \vec{\sigma}], \quad (1)$$

где \vec{n} и $\vec{\sigma}$ — соответственно единичные векторы вдоль нормали к границе раздела ЖИГ/Pt и намагниченности \vec{M} плёнки ЖИГ на интерфейсе [1, 5–15]. В экспериментах по спиновой накачке

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

когерентными СВЧ спиновыми волнами измеряется, как правило, генерируемая на концах пленки ЭДС $U \sim |J_c|$. При этом эффективность спиновой накачки принято характеризовать отношением S величины ЭДС U к падающей СВЧ-мощности ($S = U/P$) [5].

Одним из параметров, определяющих эффективность электрон-магнонного рассеяния на границе ЖИГ/Pt, является плотность состояний $\eta(f)$ в спектре спиновых волн структуры ЖИГ/Pt [16]. При этом особую роль играют частоты f^* сингулярностей ван Хофа [19] в плотности состояний магнонов ($\eta(f^*) \rightarrow \infty$), которым отвечают частоты с малыми величинами групповой скорости v_g СВ ($v_g(f^*) \rightarrow 0$). Примерами таких частот f^* , применительно к накачке спинового тока поверхностными магнитостатическими волнами (ПМСВ), являются длинноволновая (f_0) и коротковолновая (f_s) границы в спектре [20–22], а также частоты f_N , на которых ПМСВ резонансно взаимодействует с обменными модами пленки ЖИГ и формируются дипольно-обменные волны [23–25]:

$$f_N = \sqrt{(f_H + f_{ex})(f_H + f_{ex} + f_m)}, \quad (2)$$

где $f_{ex} = 2\gamma A Q^2/M$, A — обменная жесткость в ЖИГ, $\gamma = 2.8$ МГц/Э — гиромангнитное отношение в ЖИГ, $f_H = \gamma H$, $f_m = \gamma 4\pi M$, $Q = \sqrt{k^2 + k_{\perp,N}^2}$ — полное волновое число СВ, k и $k_{\perp,N} = \pi N/d$ — соответственно составляющие волнового числа Q в плоскости и по толщине d пленки, N — номер обменной моды, характеризующий число полуволн обменной волны по толщине d . Значения параметра вольт-ваттной чувствительности S детекторов спинового тока на частотах f^* могут возрастать почти на порядок [24, 25], что важно для успешного проектирования устройств спинтроники, использующих СВЧ спиновую накачку. Цель данной работы — исследовать влияние четырехмагнонной (4М) параметрической неустойчивости на спиновую накачку дипольно-обменными ПМСВ в структурах ЖИГ/Pt.

Отметим, что 4М параметрическая неустойчивость возникает при мощности волны накачки выше некоторого порогового уровня P_{th}^{4M} ($P > P_{th}^{4M}$) и при выполнении законов сохранения [26–28]:

$$2f_p = f_1 + f_2, \quad 2\vec{k}_p = \vec{k}_1 + \vec{k}_2, \quad (3)$$

где частоты $f_{p,1,2}$ и волновые векторы $\vec{k}_{p,1,2}$ отвечают, соответственно, волне накачки и параметрическим СВ. Влияние процессов (3) на спиновую накачку в структурах ЖИГ/Pt исследовалось как в условиях возбуждения ферромагнитного резонанса (ФМР) [12–15, 29–33], так и бегущих дипольных магнитостатических волн (МСВ) [6, 22]. Было показано, что падение СВЧ магнитной восприимчивости при $P > P_{th}^{4M}$, а также автоколебания и бистабильности в системе ПСВ [26–28] в структурах ЖИГ/Pt приводят к нелинейной зависимости $U = U(P)$ [6, 12, 22, 29–31], а также осцилляциям [32] и бистабильностям [33] ЭДС.

К этому следует добавить, что спиновая накачка дипольно-обменными ПМСВ мощностью ниже порога развития 4М неустойчивости ($P < P_{th}$) рассматривалась в работах [5, 24, 25]. При этом в работе [5] наблюдался рост чувствительности S спиновой накачки при резонансном возбуждении стоячей моды прямоугольного ЖИГ-резонатора на частоте гибридации латеральной и толщинной мод пленки ЖИГ с $d \approx 2.1$ мкм [12]. В работах [24, 25] рассматривалась спиновая накачка бегущими дипольно-обменными ПМСВ в макетах типа линии задержки на основе структур ЖИГ/Pt. При этом в работе [25] исследования проводились со структурой на основе двухслойной обменно-связанной пленки ЖИГ, а в [24] использовалась структура на основе пленки ЖИГ с $d \approx 0.9$ мкм. В данной работе представлены результаты исследования влияния процессов (3) на генерацию спинового тока бегущими дипольно-обменными ПМСВ в структуре ЖИГ/Pt с параметрами пленки ЖИГ, идентичными работе [24].

1. Исследуемые структуры и методика эксперимента

На рис. 1 схематично показан макет типа линии задержки (ЛЗ) на ПМСВ на основе интегральных структур ЖИГ/Pt. Макет изготавливался на основе пленки ЖИГ толщиной $d \approx 0.9$ мкм с эффективной намагниченностью насыщения $4\pi M \approx 1800$ Гс, обменной жесткостью $A = 4.7 \cdot 10^{-7}$ эрг/см и параметром релаксации $\alpha \approx 3 \cdot 10^{-4}$ (шириной линии ФМР $2\Delta H \approx 0.5$ Э), выращенной на подложке гадолиний-галлиевого граната (gadolinium-gallium garnet, GGG) с кристаллографической ориентацией (111). На поверхности ЖИГ методом магнетронного распыления была выращена пленка Pt толщиной $t \approx 9$ нм и удельным сопротивлением $\rho \approx 0.41 \cdot 10^{-6}$ Ом·м ($R_{\square} \approx 50.1$ Ом), из которой методами фотолитографии и ионного травления формировалась микрополоска длиной $L \approx 220$ мкм и шириной $W \approx 200$ мкм. Затем методом взрывной фотолитографии на поверхности ЖИГ формировались медные микроантенны СВ и контакты к пленке Pt, обозначенные, соответственно, цифрами 1, 2 и 3, 4 на рис. 1. Антенны имели апертуру $w \approx 250$ мкм, ширину $b \approx 4$ мкм, толщину $h \approx 0.5$ мкм и располагались друг от друга на расстоянии $D \approx 250$ мкм. Медные контакты имели ширину примерно 15 мкм и перекрывали пленку платины по ширине W . Также была изготовлена ЛЗ без пленки платины и медных контактов 3 и 4, которая использовалась для уточнения характеристик ПМСВ в пленке ЖИГ и анализа изменений в характеристиках, вызванных Pt и контактами 3 и 4.

Исследуемая структура размещалась между полюсами электромагнита в касательном к поверхности плёнки ЖИГ магнитном поле \vec{H} , которое ориентировалось вдоль микроантенн и могло меняться в пределах $-2473 < H < 2473$ Э. Указанная геометрия отвечает возбуждению и распространению ПМСВ Дэймона–Эшбаха [20]. Для измерения коэффициентов передачи макета ЛЗ использовался векторный анализатор цепей Keysight M9374A, который подключался к микроантеннам 1 и 2 с помощью СВЧ микрозондов Picoprobe Model 50A. Измерялись частотные зависимости коэффициентов прохождения $S_{12}(f)$ между антеннами 1 и 2 и отражения $S_{22}(f)$ от антенны 2 при различных уровнях падающей мощности P_{in} и величинах H . Набег фазы ПМСВ $\Theta(f)$ в структуре определялся как $\Theta(f) = \arctg(\text{Im}[S_{12}(f)]/\text{Re}[S_{12}(f)])$ и использовался для расчета волнового числа ПМСВ $k(f) = \Theta(f)/D$ [34].

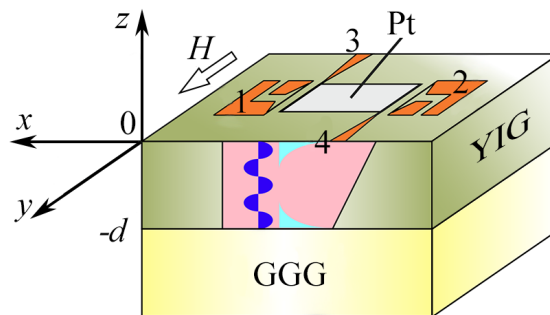


Рис. 1. Линия задержки на ПМСВ на основе микроструктуры ЖИГ/Pt: 1, 2 — медные микроантенны СВ; 3, 4 — медные контакты к пленке Pt. Стрелкой обозначено направление магнитного поля H . На вставке розовым, синим и бирюзовым цветом схематично показан характер распределения по толщине пленки намагниченности $|m(z)|$ для, соответственно, дипольной ПМСВ Дэймона–Эшбаха, обменных объемной и поверхностных мод [23] (цвет онлайн)

Fig. 1. The delay line on MSSW based on a YIG/Pt microstructure: 1, 2 — copper microantennas of spin waves (SW); 3, 4 — copper contacts to Pt film. Direction of magnetic field H is denoted by an arrow. In the inset, a character of magnetization $|m(z)|$ distribution across the thickness is schematically shown for dipole Damon–Eshbach MSSW, exchange volume and surface modes [23] by pink, blue and light-blue colours, respectively (color online)

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

Измерение ЭДС $U(f)$, генерируемой на контактах (3, 4) к пленке Pt при распространении ПМСВ на частоте f , проводилось с помощью селективного вольтметра (SR830) в режиме модуляции падающей СВЧ-мощности P_{in} меандром с частотой $\Omega_t \approx 11.33$ кГц. Такой подход к измерению сигнала $U(f)$ позволяет снизить влияние шумов и паразитных сигналов на процесс измерения, а также уменьшить вклад со стороны термоЭДС, вызванный неоднородным нагревом структуры СВЧ-мощностью. При этом вклад в ЭДС со стороны процессов электрон-магнетонного рассеяния, характеризуемый временами $\tau_{e-m} \sim 10^{-12}$ с [35], отслеживает модуляцию мощности практически безынерционно.

Для исследования влияния 4М параметрических процессов на генерацию спинового тока необходимо создать условия, при которых на частоте накачки f_p оказываются запрещены параметрические процессы трехмагнетонного (3М) распада, характеризующиеся наименьшими уровнями пороговой мощности P_{th}^{3M} ($P_{th}^{3M} \ll P_{th}^{4M}$) [26–28]. Добиться этого можно при выполнении условия [36–38]:

$$f_p > 2(f_H + f_{ex}). \quad (4)$$

Применительно к случаю дипольных ПМСВ, когда вкладом частоты f_{ex} обменного сдвига «дна» спектра можно пренебречь, условие (4) в пленках ЖИГ выполняется во всей полосе частот ПМСВ при поле $H > 2\pi M \approx 875$ Э [36–38]. Далее будут обсуждаться результаты экспериментов при $H = 939$ Э. При этом достижение условий развития 4М неустойчивости ПМСВ определялось стандартным методом [22, 39, 40] по снижению модуля коэффициента прохождения $|S_{12}(f, P)|$ при $P > P_{th}^{4M}$.

2. Результаты и обсуждение

В данном разделе обсуждаются результаты, доказывающие, что исследуемые структуры ЖИГ/Pt поддерживают распространение дипольно-обменных ПМСВ и что на частотах дипольно-обменных резонансов наблюдается резонансный рост эффективности спиновой накачки, связанный с сингулярностями ван Хофа. Для того чтобы детальнее обсудить влияние 4М параметрических процессов на спиновую накачку дипольно-обменными ПМСВ в структурах ЖИГ/Pt, предварительно рассматриваются нелинейные дипольно-обменные ПМСВ в макете ЛЗ на основе пленки ЖИГ без Pt.

2.1. Нелинейные дипольно-обменные ПМСВ в пленке ЖИГ. На рис. 2, а приведены измеренные при различных уровнях падающей мощности P_{in} спектры передачи макетов ЛЗ на основе пленки ЖИГ. Можно видеть, что при уровне мощности $P_{in} = -20$ дБм на частотах, отмеченных звездочками, в зависимостях $|S_{12}(f, P)|$ наблюдаются резонансного вида «провалы», что характерно [23, 41] для резонансного взаимодействия дипольных ПМСВ с обменными объемными модами пленки на частотах f_N , которые могут быть рассчитаны согласно формуле (2). Резонансный рост потерь на частотах f_N сопровождается, в соответствии с соотношением Крамерса–Кронига, формированием аномальных участков в законе дисперсии $k(f)$ ПМСВ [41, 42]. Это можно видеть из вставки к рис. 2, б, где представлены результаты измерения $k(f)$ в пленке ЖИГ на частоте резонанса ПМСВ с обменной модой номера $N = 3$. Результаты измерения закона дисперсии вне частот дипольно-обменных резонансов показаны на рис. 2, б кривой 1 и, в целом, соответствуют закону дисперсии ПМСВ Дэймона–Эшбаха [20]:

$$f^2 = f_0^2 + 1/4 f_m^2 (1 - \exp(-2kd)). \quad (5)$$

где $f_0^2 = f_H^2 + f_H \cdot f_m$.

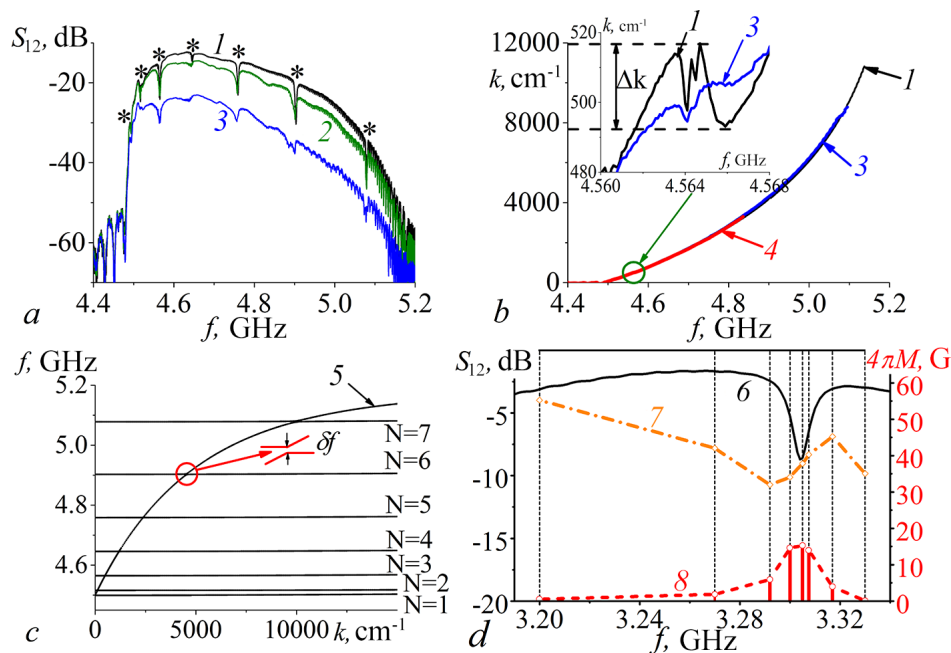


Рис. 2. Результаты измерения при $H = 939$ Э частотных зависимостей коэффициента прохождения $S_{12}(f)$ (а) и законов дисперсии $k(f)$ (б) в макетах на основе пленки ЖИГ при $P_{in} = -20$ (1), -10 (2), 0 (3) дБм, кривой 4 показан результат измерения дисперсии в структуре ЖИГ/Pt при $P_{in} = -20$ дБм, на вставке к рис. б показан участок дисперсии с аномальным поведением; с – рассчитанный спектр дипольно-обменных ПМСВ в пленке ЖИГ с номерами обменных мод $N = 1...7$, где кривой 5 показана дисперсионная зависимость ПМСВ Дэймона–Эшбаха, на вставке к рис. с показан характер расталкивания дисперсионных кривых в окрестности резонанса ПМСВ с обменной модой номера $N = 6$ и образование «щели» $\delta f \approx 5$ МГц в спектре; d – микромагнитное моделирование частотных зависимостей в окрестности частоты дипольно-обменного резонанса с номером $N = 5$: кривая 6 отвечает $S_{12}(f)$; кривые 7 и 8 отвечают амплитуде намагниченности $|m(z)|$ на границе $z = 0$ и амплитуде объемной обменной моды, соответственно. Характер распределения объемной моды показан синим цветом на вставке к рис. 1 (цвет онлайн)

Fig. 2. Measurements results of frequency dependencies of transmission coefficient $S_{12}(f)$ (a) and dispersions $k(f)$ (b) in the structures based on YIG films at $H = 939$ Oe and $P_{in} = -20$ (1), -10 (2), 0 (3) dBm; curve 4 shows the measured dispersion in the YIG/Pt structure at $P_{in} = -20$ dBm; the inset to Fig. b shows the part of dispersion with anomalous behavior; c – calculated spectrum of dipole-exchange MSSW in the YIG film with the numbers of exchange modes $N = 1...7$ where the curve 5 shows the dispersion of Damon–Eshbach MSSW; the inset to Fig. c demonstrates the character of dispersion repulsion in the vicinity of the resonance of MSSW with the exchange mode with number $N = 6$ and formation of a spectrum “gap” $\delta f \approx 5$ MHz; d – micromagnetic modeling of the frequency dependencies in the vicinity of the dipole-exchange resonance with the number $N = 5$: the curve 6 corresponds to $S_{12}(f)$, the curves 7 and 8 correspond to the amplitude of magnetization $|m(z)|$ at the border $z = 0$ and to the amplitude of volume exchange mode, respectively. The character of volume mode distribution is shown by blue color in the inset to Fig. 1 (color online)

На рис. 2, с приведены результаты расчета спектра $f = f(k)$ дипольно-обменных ПМСВ в пленке с выбранными параметрами, выполненные в бездиссипативном приближении в рамках подхода [23]. На вставке к рис. 2, с приведен характер дисперсии в окрестности резонанса ПМСВ с обменной модой номера $N = 6$. Можно видеть, что дисперсионные кривые расталкиваются и формируют «щель» $\delta f \approx 5$ МГц в спектре. При достаточно большой диссипации [41, 42] «щель» в спектре исчезает, но возникает аномальный участок дисперсии (см. вставку к рис. 2, б) и резонансный рост потерь, см. узкие «провалы» в зависимости $|S_{12}(f, P)|$ на рис. 2, а. Следует отметить, что на частотах f_N в спектре формируются участки дисперсии $f = f(k)$ с малой групповой скоростью $v_g(f_N) = 2\pi\partial f/\partial k \rightarrow 0$. При этом следует ожидать, что на частотах f_N в плотности состояний СВ будут возникать сингулярности ван Хова $\eta(f_N) \rightarrow \infty$ [19].

На рис. 2, *d* в рамках подхода [43–45] приведены результаты микромагнитного моделирования частотных зависимостей в окрестности частоты дипольно-обменного резонанса с $N = 5$ коэффициента прохождения волны (кривая 6), а также амплитуд намагниченности на поверхности пленки ЖИГ $|m(z = 0)|$ (кривая 7) и амплитуды объемной обменной (кривая 8). Характер распределения амплитуды объемной моды $|m(z)|$ по толщине пленки иллюстрирует осциллирующая синяя вставка к рис. 1. Можно видеть, что на частоте дипольно-обменного резонанса возникает резонансный рост потерь (кривая 6). При этом амплитуда намагниченности на границе $z = 0$, к которой «прижата» ПМСВ Дэймона–Эшбаха, падает (кривая 7). Одновременно происходит рост амплитуды объемной обменной моды (кривая 8). В целом, такое поведение намагниченности отражает перераспределение энергии между двумя колебательными подсистемами в условиях резонанса.

При мощности ПМСВ выше порога параметрической неустойчивости $P > P_{th}^{4M}$ амплитуда коэффициента S_{12} падает из-за влияния нелинейного затухания и падения высокочастотной магнитной восприимчивости, что можно видеть из сравнения кривых 1, 2 и 3 на рис. 2, *a*. Также видно, что с ростом P резонансные особенности в зависимости $|S_{12}(f, P)|$ сглаживаются. Одновременно уменьшается «амплитуда» Δk аномального участка в законе дисперсии на частотах f_N (см. рис. 2, *b*). В целом такое поведение зависимостей $|S_{12}(f, P)|$ и $k(f)$ с ростом P_{in} указывает на разрушение дипольно-обменных резонансов процессами (3). Для макета ЛЗ на основе пленки ЖИГ значение P_{th}^{4M} составляет $P_{th}^{4M} \approx 20$ мкВт. Указанным пороговым мощностям можно сопоставить пороговые значения амплитуды намагниченности m_{th}^{4M} ПМСВ с помощью соотношения [39, 40]:

$$m_{th}^{4M} = \sqrt{\frac{P_{th}}{v_g \cdot w \cdot d}}, \quad (6)$$

где произведение $w \cdot d$ определяет площадь сечения пленки, через которое переносится мощность ПМСВ. Рассчитанные с помощью (6) значения m_{th} при параметрах, отвечающих рис. 1 составляют в случае 4М процессов $m_{th}^{4M} \approx 1.2$ Гс, что согласуется с оценкой в рамках теории Сулла для однородной накачки [26–28] $m_{th}^{4M} \approx \sqrt{M \cdot \Delta H / (4\pi)} \approx 1.7$ Гс.

2.2. Влияние 4М параметрических процессов на спиновую накачку дипольно-обменными ПМСВ в структуре ЖИГ/Pt. Прежде чем обсудить влияние процессов (3) на генерацию ЭДС в структуре ЖИГ/Pt за счет спиновой накачки дипольно-обменными ПМСВ, рассмотрим некоторые изменения в характеристиках распространения ПМСВ, вызванные металлизацией пленки ЖИГ. Во-первых, размещение между входным и выходным преобразователями пленки Pt и контактов 3, 4 (см. рис. 1) приводит к заметному ослаблению ПМСВ по сравнению со случаем макета ЛЗ на основе пленки ЖИГ (см. кривые 1 и 2 на рис. 3, *a*). Оказалось, что отмеченный рост потерь ПМСВ обусловлен, в основном, медными контактными микрополосками на платине. В этом мы убедились, изготовив макет ЛЗ без пленки Pt, но с медными контактами 3 и 4, и получив для него зависимость $S_{12}(f)$, различающуюся с кривой 1 на рис. 3, *a* в пределах 1–2 дБ. Отметим, что влияние электронов проводимости на дисперсию и затухание ПМСВ характеризуется параметром спин-электронной связи $G = h / (k \cdot l_{sk}^2)$ [46]. При толщине металла $h = 500$ нм, глубине скин-слоя $l_{sk} \approx 1$ мкм и диапазона волновых чисел $1500 < k < 8000$ см⁻¹ параметр G принимает значения $3 > G > 0.6$. При таких значениях G распространяющихся ПМСВ в металлизированной пленке ЖИГ нет [47, 48].

Однако результаты измерения зависимости $k = k(f)$ для структуры ЖИГ/Pt оказались близки к случаю не металлизированной пленки (см. кривую 4, рис. 2, *b*). Это можно объяснить, если принять во внимание следующие обстоятельства. В нашем случае по ширине медного контакта порядка 15 мкм укладывается не более четырех длин волн ПМСВ. Кроме того, протяженность

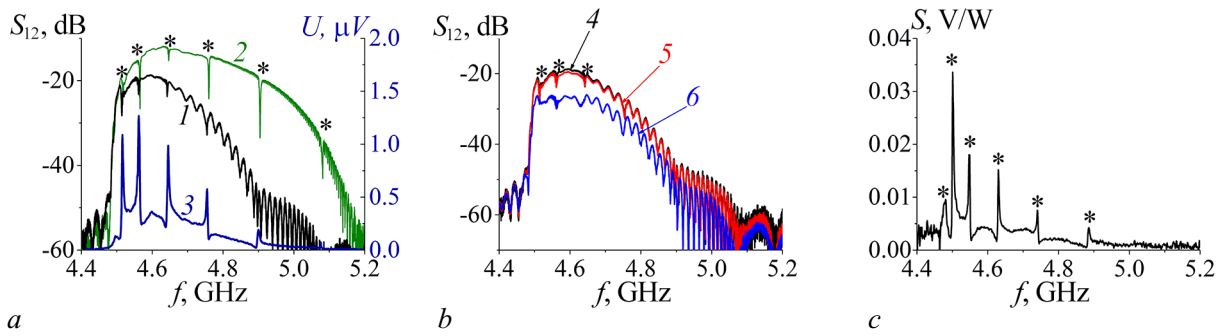


Рис. 3. Структура ЖИГ/Pt. *a* – Частотные зависимости $S_{12}(f)$ и $U(f)$ (кривые 1 и 3) при $P_{in} = -10$ дБм, кривой 2 показана зависимость $S_{12}(f)$ в макете ЛЗ на основе пленки ЖИГ; *b* – $S_{12}(f)$ при $P_{in} = -20$ (4), -10 (5) и 0 (6) дБм; *c* – Частотная зависимость вольт-ваттной чувствительности $S(f)$ при $P_{in} = -10$ дБм (цвет онлайн)

Fig. 3. YIG/Pt structure. *a* – Frequency dependencies $S_{12}(f)$ and $U(f)$ (curves 1 and 3) at $P_{in} = -10$ dBm; the curve 2 shows the $S_{12}(f)$ dependence in the delay line structure based on YIG film; *b* – $S_{12}(f)$ at $P_{in} = -20$ (4), -10 (5) and 0 (6) dBm; *c* – The frequency dependence of volt-watt sensitivity $S(f)$ at $P_{in} = -10$ dBm (color online)

участка пленки под медными контактами в направлении распространения ПМСВ составляет примерно 12% от расстояния между входной и выходной антеннами. Наконец, на участке макета ЛЗ, покрытом пленкой Pt при $t \approx 9$ нм и $l_{sk} \approx 7$ мкм, параметр $G < 0.1$ и влияние платины на дисперсию ПМСВ мало [22].

Во-вторых, вносимые электронные потери приводят к заметному росту уровня падающей мощности P_{in} , необходимого для достижения порога 4М параметрической неустойчивости ПМСВ. Действительно, из сравнения спектров передачи $|S_{12}(f, P)|$ при $P_{in} = -20$ дБм и $P_{in} = -10$ дБм, показанных кривыми 1 и 2 на рис. 2, *a* и рис. 3, *b*, можно видеть, что в структуре ЖИГ/Pt изменения, вызванные развитием параметрической неустойчивости, при $P_{in} = -10$ дБм наблюдаются лишь в узком диапазоне частот, тогда как в пленке ЖИГ без платины они видны во всей полосе частот и в разы больше.

С учетом сказанного обратимся теперь к результатам измерения эффекта генерации ЭДС в структуре ЖИГ/Pt в зависимости от уровня мощности P . На рис. 3, *a* кривой 3 показана частотная зависимость ЭДС $U(f)$ при уровне падающей мощности $P_{in} = -20$ дБм. Видно, что на частотах, отмеченных «*», ЭДС резонансно возрастает. При этом вольт-ваттная чувствительность S также демонстрирует рост значений почти на порядок (см. рис. 3, *c*). Мы связываем такой рост ЭДС с возникновением сингулярностей ван Хофа в плотности состояний $\eta(f)$ на частотах f_N , что должно приводить к росту эффективности электрон-магнетонного рассеяния [16].

Действительно, если при объяснении роста ЭДС опираться на пропорциональность плотности спинового тока $|J_s|$ амплитуде намагниченности на интерфейсе $|m(z=0)|$, то, согласно результатам микромагнитного моделирования, показанным кривой 6 на рис. 2, *d*, величина ЭДС должна снижаться пропорционально уменьшению $|m(z=0)|$ на частоте резонанса f_N . Кроме того, из сопоставления значений ЭДС или чувствительности S для резонансов с различными номерами N , показанных на рис. 3, *c*, следует, что эти величины напрямую не связаны со значениями проекции волнового числа на нормаль к пленке $k_{\perp, N} = \pi N/d$.

Рассмотрим теперь влияние 4М параметрических процессов на генерацию ЭДС дипольно-обменными ПМСВ. На рис. 4, *a* приведены результаты измерения зависимостей $U(f)$ при различных уровнях падающей мощности. Можно видеть, что ЭДС на резонансных частотах f_N уменьшается с ростом P_{in} . При дальнейшем увеличении P_{in} резонансные особенности в зависимости $U(f)$ могут исчезнуть. Это иллюстрирует рис. 4, *b*, где приведены зависимости $U = U(P_{in})$ для частоты $f_1 \approx 4.952$ ГГц, находящейся между резонансными частотами $f_{N=3}$

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

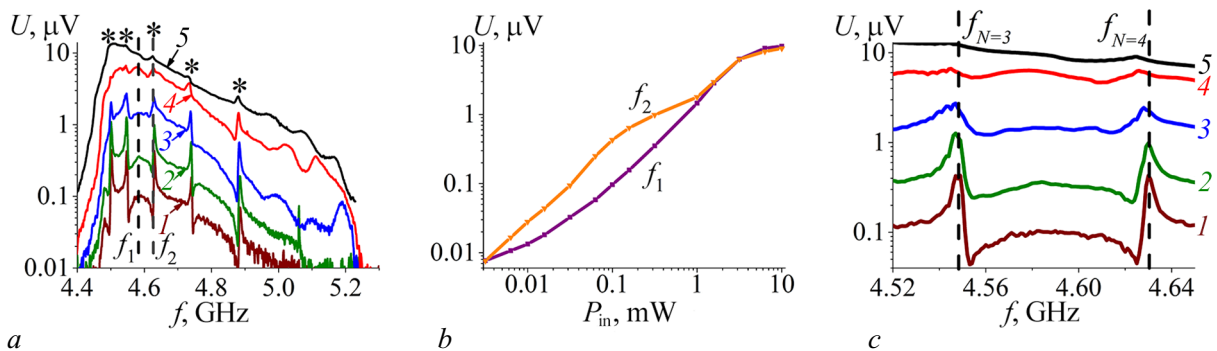


Рис. 4. *a* – Кривые 1–5 отвечают, соответственно, зависимостям $U(f)$ при $P_{\text{in}} = -10; -5; 0; 5; 10$ дБм; *b* – зависимости $U = U(P_{\text{in}})$ на частотах $f_1 \approx 4.582$ ГГц и $f_2 \approx 4.631$ ГГц, положение которых показано вертикальными пунктирными линиями на рис. *a*; *c* – влияние мощности ПМСВ на положение частот дипольно-обменных резонансов с номерами $N = 3$ и $N = 4$, вертикальные пунктирные линии показывают положение пика ЭДС на частотах $f_{N=3}$ и $f_{N=4}$ при $P_{\text{in}} = -10$ дБм (цвет онлайн)

Fig. 4. *a* – The curves 1–5 show the $U(f)$ dependencies at $P_{\text{in}} = -10; -5; 0; 5; 10$ dBm; *b* – the dependencies $U = U(P_{\text{in}})$ at frequencies $f_1 \approx 4.582$ GHz and $f_2 \approx 4.631$ GHz, which position is shown by vertical dash lines in Fig. *a*; *c* – the influence of MSSW power on position of dipole-exchange resonances with the numbers $N = 3$ and $N = 4$; vertical dash lines show the EMF peak position at frequencies $f_{N=3}$ and $f_{N=4}$ at $P_{\text{in}} = -10$ dBm (color online)

и $f_{N=4}$, и $f_2 \approx 4.631$ ГГц, которая при $P_{\text{in}} = -10$ дБм отвечает резонансной частоте $f_{N=4}$. Можно видеть, что зависимости $U = U(f_{1,2}, P_{\text{in}})$ нелинейны и имеют тенденцию к насыщению с ростом P_{in} . При этом следует отметить, что зависимость $U(P_{\text{in}})$ для частоты f_1 растет быстрее при падающей мощности $0.2 < P_{\text{in}} < 1$ мВт.

Такое поведение можно объяснить, связав величину пика ЭДС с амплитудой Δk участка аномальной дисперсии на частоте дипольно-обменного резонанса, см. вставку к рис. 2, *b*. Исчезновение аномальных участков в спектре ПМСВ отражает отключение процесса заселения участков спектра бегущими дипольно-обменными ПМСВ и, как следствие, падение эффективности электрон-магнонного рассеяния на интерфейсе. Сказанное отнюдь не означает, что уменьшается число магнонов на интерфейсе. Наоборот, разрушение дипольно-обменного резонанса на частоте накачки приводит к уменьшению числа магнонов, «уходящих» от поверхности в объем пленки. Причиной падения эффективности электрон-магнонного рассеяния является уменьшение числа состояний, в которые может рассеяться ферми-частица (электрон) из-за исчезновения сингулярностей в спектре СВ.

К этому следует добавить, что в ряде случаев процессы (3), наоборот, могут способствовать более быстрому росту зависимости $U(P_{\text{in}})$. Сказанное иллюстрирует зависимость $U = U(f_1, P_{\text{in}})$ на рис. 4, *b* при $0.2 < P_{\text{in}} < 1$ мВт. Такое поведение $U = U(f_1, P_{\text{in}})$ можно объяснить, если принять во внимание, что рождаемые в результате процессов (3) параметрические СВ заселяют участки спектра СВ с сингулярностями в плотности состояний. Важно также отметить, что на частотах сингулярностей ван Хофа растет эффективная масса магнонов $m^{\text{eff}} \sim \hbar \frac{\partial^2 f}{\partial k^2}$ и может быть больше массы электронов в платине. Интуитивно понятно, что «тяжелые» магноны эффективнее рассеивают электроны.

Отметим, что к разрушению дипольно-обменных резонансов приводит не только рост нелинейных потерь в результате процессов (3). Нелинейность и диссипация приводят к тому, что пленка ЖИГ становится неоднородна в направлении распространения волны [22, 39, 40, 49]. Измеряемые в эксперименте зависимости $\Delta k(f, P_{\text{in}})$ отражают интегральный набег фазы нелинейной волны в макете ЛЗ [40]. При этом локальные изменения дисперсионных характеристик могут оказаться гораздо больше по величине.

Следует также учитывать нелинейный сдвиг спектра СВ, вызванный уменьшением проекции намагниченности пленки $4\pi M_y(x)$ на направление магнитного поля \vec{H} за счет разогрева пленки СВЧ-мощностью и эффекта динамического размагничивания [22, 49]:

$$4\pi M_y(x) = \gamma 4\pi M_0 \cdot \left(1 - \frac{m(x)^2}{M_0^2}\right), \quad (7)$$

где амплитуда $m(x=0)$ связана с P_{in} через соотношение (6), а зависимость от координаты x отражает затухание амплитуды ПМСВ $m(x)$ при распространении (см. рис. 1). При этом от P_{in} и координаты x оказываются зависимыми все характерные частоты, определяющие частоты дипольно-обменных резонансов:

$$f_0(x) = \sqrt{f_H^2 + f_H \cdot f_m(x)}, \quad f_m(x) = \gamma 4\pi M_y(x), \quad (8)$$

$$f_N(x) = \sqrt{(f_H + f_{ex}(x))(f_H + f_{ex}(x) + f_m(x))}. \quad (9)$$

На рис. 4, с приведены зависимости от P_{in} положения максимумов в частотной зависимости ЭДС для дипольно-обменных резонансов на частотах $f_{N=3}$ и $f_{N=4}$. Видно, что с ростом мощности одновременно с «разрушением» резонансных пиков происходит их сдвиг «вниз» по частоте.

Заключение

Таким образом, исследовано влияние процессов четырехмагнонной параметрической неустойчивости на генерацию спинового тока при спиновой накачке дипольно-обменными поверхностными магнитостатическими волнами, распространяющимися в линии задержки на основе структуры ЖИГ(900 нм)/Pt(9 нм). Используя для детектирования спинового тока ЭДС, генерируемую за счет обратного спинового эффекта Холла, показано, что эффективность накачки резонансно растет на частотах дипольно-обменных резонансов. Такой рост объясняется ростом эффективности электрон-магнонного рассеяния за счет сингулярностей ван Хофа в плотности состояний спиновых волн и большой эффективной массой магнонов на частотах дипольно-обменных резонансов. Обнаружено, что рост мощности поверхностных магнитостатических волн за порогом P_{th}^{4M} развития 4М неустойчивости приводит к «сглаживанию» резонансных особенностей в частотной зависимости ЭДС $U(f)$. Такое влияние 4М процессов на зависимость $U(f)$ объясняется снижением эффективности спиновой накачки из-за разрушения при $P > P_{th}^{4M}$ дипольно-обменных резонансов и связанных с ними сингулярностей в плотности состояний спиновых волн в спектре структуры ЖИГ/Pt. Полученные результаты могут представлять интерес для разработки высокочувствительных детекторов спинового тока и устройств спинтроники.

Список литературы

1. Kajiwara Y., Harii K., Takahashi S., Ohe J., Uchida K., Mizuguchi M., Umezawa H., Kawai H., Ando K., Takanashi K., Maekawa S., Saitoh E. Transmission of electrical signals by spin-wave interconversion in a magnetic insulator // Nature. 2010. Vol. 464, no. 7286. P. 262–266. DOI: 10.1038/nature08876.
2. Sinova J., Valenzuela S. O., Wunderlich J., Back C. H., Jungwirth T. Spin Hall effects // Rev. Mod. Phys. 2015. Vol. 87, no. 4. P. 1213–1260. DOI: 10.1103/RevModPhys.87.1213.
3. Althammer M. Pure spin currents in magnetically ordered insulator/normal metal heterostructures // J. Phys. D: Appl. Phys. 2018. Vol. 51, no. 31. P. 313001. DOI: 10.1088/1361-6463/aaca89.
4. Brataas A., van Wees B., Klein O., de Loubens G., Viret M. Spin insulatronics // Physics Reports. 2020. Vol. 885. P. 1–27. DOI: 10.1016/j.physrep.2020.08.006.

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

5. Sandweg C. W., Kajiwara Y., Ando K., Saitoh E., Hillebrands B. Enhancement of the spin pumping efficiency by spin wave mode selection // *Appl. Phys. Lett.* 2010. Vol. 97, no. 25. P. 252504. DOI: 10.1063/1.3528207.
6. Chumak A. V., Serga A. A., Jungfleisch M. B., Neb R., Bozhko D. A., Tiberkevich V. S., Hillebrands B. Direct detection of magnon spin transport by the inverse spin Hall effect // *Appl. Phys. Lett.* 2012. Vol. 100, no. 8. P. 082405. DOI: 10.1063/1.3689787.
7. Balinsky M., Ranjbar M., Haidar M., Dürrenfeld P., Khartsev S., Slavin A., Åkerman J., Dumas R. K. Spin pumping and the inverse spin-hall effect via magnetostatic surface spin-wave modes in Yttrium-Iron garnet/platinum bilayers // *IEEE Magn. Lett.* 2015. Vol. 6. P. 3000604. DOI: 10.1109/LMAG.2015.2471276.
8. Iguchi R., Ando K., Qiu Z., An T., Saitoh E., Sato T. Spin pumping by nonreciprocal spin waves under local excitation // *Appl. Phys. Lett.* 2013. Vol. 102, no. 2. P. 022406. DOI: 10.1063/1.4775685.
9. d'Allivy Kelly O., Anane A., Bernard R., Ben Youssef J., Hahn C., Molpeceres A. H., Carrétéro C., Jacquet E., Deranlot C., Bortolotti P., Lebourgeois R., Mage J.-C., de Loubens G., Klein O., Cros V., Fert A. Inverse spin Hall effect in nanometer-thick yttrium iron garnet/Pt system // *Appl. Phys. Lett.* 2013. Vol. 103, no. 8. P. 082408. DOI: 10.1063/1.4819157.
10. Uchida K., Xiao J., Adachi H., Ohe J., Takahashi S., Ieda J., Ota T., Kajiwara Y., Umezawa H., Kawai H., Bauer G. E. W., Maekawa S., Saitoh E. Spin Seebeck insulator // *Nature Materials.* 2010. Vol. 9, no. 11. P. 894–897. DOI: 10.1038/nmat2856.
11. Agrawal M., Vasyuchka V. I., Serga A. A., Kirihara A., Pirro P., Langner T., Jungfleisch M. B., Chumak A. V., Papaioannou E. T., Hillebrands B. Role of bulk-magnon transport in the temporal evolution of the longitudinal spin-Seebeck effect // *Phys. Rev. B.* 2014. Vol. 89, no. 22. P. 224414. DOI: 10.1103/PhysRevB.89.224414.
12. Sandweg C. W., Kajiwara Y., Chumak A. V., Serga A. A., Vasyuchka V. I., Jungfleisch M. B., Saitoh E., Hillebrands B. Spin pumping by parametrically excited exchange magnons // *Phys. Rev. Lett.* 2011. Vol. 106, no. 21. P. 216601. DOI: 10.1103/PhysRevLett.106.216601.
13. Kurebayashi H., Dzyapko O., Demidov V. E., Fang D., Ferguson A. J., Demokritov S. O. Controlled enhancement of spin-current emission by three-magnon splitting // *Nature Materials.* 2011. Vol. 10, no. 9. P. 660–664. DOI: 10.1038/nmat3053.
14. Kurebayashi H., Dzyapko O., Demidov V. E., Fang D., Ferguson A. J., Demokritov S. O. Spin pumping by parametrically excited short-wavelength spin waves // *Appl. Phys. Lett.* 2011. Vol. 99, no. 16. P. 162502. DOI: 10.1063/1.3652911.
15. Manuilov S. A., Du C. H., Adur R., Wang H. L., Bhallamudi V. P., Yang F. Y., Hammel P. C. Spin pumping from spinwaves in thin film YIG // *Appl. Phys. Lett.* 2015. Vol. 107, no. 4. P. 042405. DOI: 10.1063/1.4927451.
16. Tveten E. G., Brataas A., Tserkovnyak Y. Electron-magnon scattering in magnetic heterostructures far out of equilibrium // *Phys. Rev. B.* 2015. Vol. 92, no. 18. P. 180412. DOI: 10.1103/PhysRevB.92.180412.
17. Saitoh E., Ueda M., Miyajima H., Tatara G. Conversion of spin current into charge current at room temperature: Inverse spin-Hall effect // *Appl. Phys. Lett.* 2006. Vol. 88, no. 18. P. 182509. DOI: 10.1063/1.2199473.
18. Maekawa S., Adachi H., Uchida K., Ieda J., Saitoh E. Spin current: Experimental and theoretical aspects // *J. Phys. Soc. Jpn.* 2013. Vol. 82, no. 10. P. 102002. DOI: 10.7566/JPSJ.82.102002.
19. Van Hove L. The occurrence of singularities in the elastic frequency distribution of a crystal // *Phys. Rev.* 1953. Vol. 89, no. 6. P. 1189–1193. DOI: 10.1103/PhysRev.89.1189.
20. Damon R. W., Eshbach J. R. Magnetostatic modes of a ferromagnet slab // *Journal of Physics and Chemistry of Solids.* 1961. Vol. 19, no. 3–4. P. 308–320. DOI: 10.1016/0022-3697(61)90041-5.
21. Nikulin Y. V., Seleznev M. E., Khivintsev Y. V., Sakharov V. K., Pavlov E. S., Vysotskii S. L.,

- Kozhevnikov A. V., Filimonov Y. A.* EMF generation by propagating magnetostatic surface waves in integrated thin-film Pt/YIG structure // *Semiconductors*. 2020. Vol. 54, no. 12. P. 1721–1724. DOI: 10.1134/S106378262012026X.
22. *Селезнев М. Е., Никулин Ю. В., Хивинцев Ю. В., Высоцкий С. Л., Кожевников А. В., Сахаров В. К., Дудко Г. М., Павлов Е. С., Филимонов Ю. А.* Влияние трехмагнонных распадов на генерацию ЭДС поверхностными магнитостатическими волнами в интегральных структурах ЖИГ–Pt // *Известия вузов. ПНД*. 2022. Т. 30, № 5. С. 617–643. DOI: 10.18500/0869-6632-003008.
 23. *De Wames R. E., Wolfram T.* Dipole-exchange spin waves in ferromagnetic films // *J. Appl. Phys.* 1970. Vol. 41, no. 3. P. 987–993. DOI: 10.1063/1.1659049.
 24. *Селезнев М. Е., Никулин Ю. В., Сахаров В. К., Хивинцев Ю. В., Кожевников А. В., Высоцкий С. Л., Филимонов Ю. А.* Влияние резонансного взаимодействия поверхностных магнитостатических волн с обменными модами на генерацию ЭДС в структурах YIG/Pt // *ЖТФ*. 2021. Т. 91, № 10. С. 1504–1508. DOI: 10.21883/JTF.2021.10.51363.136-21.
 25. *Никулин Ю. В., Кожевников А. В., Высоцкий С. Л., Селезнев М. Е., Хивинцев Ю. В., Филимонов Ю. А.* Исследование интерференции поверхностных магнитостатических волн с помощью обратного спинового эффекта Холла // *ФТТ*. 2022. Т. 64, № 9. С. 1293–1297. DOI: 10.21883/FTT.2022.09.52822.21НН.
 26. *Гуревич А. Г., Мелков Г. А.* Магнитные колебания и волны. М.: Физматлит, 1994. 464 с.
 27. *Вашковский А. В., Стальмахов В. С., Шараевский Ю. П.* Магнитостатические волны в электронике сверхвысоких частот. Саратов: Издательство Саратовского университета, 1993. 312 с.
 28. *Львов В. С.* Нелинейные спиновые волны. М.: Наука, 1987. 272 с.
 29. *Castel V., Vlietstra N., Ben Youssef J., Van Wees B. J.* Platinum thickness dependence of the inverse spin-Hall voltage from spin pumping in a hybrid yttrium iron garnet/platinum system // *Appl. Phys. Lett.* 2012. Vol. 101, no. 13. P. 132414. DOI: 10.1063/1.4754837.
 30. *Castel V., Vlietstra N., Van Wees B. J., Ben Youssef J.* Frequency and power dependence of spin-current emission by spin pumping in a thin-film YIG/Pt system // *Phys. Rev. B*. 2012. Vol. 86, no. 13. P. 134419. DOI: 10.1103/PhysRevB.86.134419.
 31. *Jungfleisch M. B., Chumak A. V., Kehlberger A., Lauer V., Kim D. H., Onbasli M. C., Ross C. A., Kläui M., Hillebrands B.* Thickness and power dependence of the spin-pumping effect in Y3Fe5O12/Pt heterostructures measured by the inverse spin Hall effect // *Phys. Rev. B*. 2015. Vol. 91, no. 13. P. 134407. DOI: 10.1103/PhysRevB.91.134407.
 32. *Watanabe S., Hirobe D., Shiomi Y., Iguchi R., Daimon S., Kameda M., Takahashi S., Saitoh E.* Generation of megahertz-band spin currents using nonlinear spin pumping // *Scientific Reports*. 2017. Vol. 7, no. 1. P. 4576. DOI: 10.1038/s41598-017-04901-4.
 33. *Ando K., Saitoh E.* Spin pumping driven by bistable exchange spin waves // *Phys. Rev. Lett.* 2012. Vol. 109, no. 2. P. 026602. DOI: 10.1103/PhysRevLett.109.026602.
 34. *Khivintsev Y. V., Filimonov Y. A., Nikitov S. A.* Spin wave excitation in yttrium iron garnet films with micron-sized antennas // *Appl. Phys. Lett.* 2015. Vol. 106, no. 5. P. 052407. DOI: 10.1063/1.4907626.
 35. *Nur Kholid F., Hamara D., Terschanski M., Mertens F., Bossini D., Cinchetti M., McKenzie-Sell L., Patchett J., Petit D., Cowburn R., Robinson J., Barker J., Ciccarelli C.* Temperature dependence of the picosecond spin Seebeck effect // *Appl. Phys. Lett.* 2021. Vol. 119, no. 3. P. 032401. DOI: 10.1063/5.0050205.
 36. *Медников А. М.* Нелинейные эффекты при распространении поверхностных спиновых волн в пленках ЖИГ // *ФТТ*. 1981. Т. 23, № 1. С. 242–245.
 37. *Темирязев А. Г.* Механизм преобразования частоты поверхностной магнитостатической волны в условиях трехмагнонного распада // *ФТТ*. 1987. Т. 29, № 2. С. 313–319.

Селезнёв М. Е., Никулин Ю. В., Хивинцев Ю. В., Высоцкий С. Л., Кожевников А. В., Сахаров В. К., Дудко Г. М., Филимонов Ю. А.
Известия вузов. ПНД, 2023, т. 31, № 2

38. Ползикова Н. И., Раевский А. О., Темиряев А. Г. Влияние обменного взаимодействия на границу трехмагнетонного распада волны Дэймона–Эшбаха в тонких пленках ЖИГ // ФТТ. 1984. Т. 26, № 11. С. 3506–3508.
39. Казаков Г. Т., Кожевников А. В., Филимонов Ю. А. Четырехмагнетонный распад поверхностных магнитостатических волн в пленках железо-иттриевого граната // ФТТ. 1997. Т. 39, № 2. С. 330–338.
40. 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.
41. Гуляев Ю. В., Бугаев А. С., Зильберман П. Е., Игнатъев И. А., Коновалов А. Г., Луговской А. В., Медников А. М., Нам Б. П., Николаев Е. И. Гигантские осцилляции прохождения квазиповерхностной спиновой волны через тонкую пленку железо-иттриевого граната // Письма в ЖЭТФ. 1979. Т. 30, № 9. Р. 600–603.
42. Гуляев Ю. В., Зильберман П. Е., Луговской А. В. Влияние неоднородного обмена и диссипации на распространение поверхностных волн Деймона–Эшбаха в ферромагнитной пластине // ФТТ. 1981. Т. 23, № 4. С. 1136–1142.
43. Donahue M. J., Porter D. G. OOMMF User's Guide. Interagency Report NISTIR 6376. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology, 1999. 94 p. DOI: 10.6028/NIST.IR.6376.
44. Dvornik M., Au Y., Kruglyak V. V. Micromagnetic Simulations in Magnonics. In: Demokritov S., Slavin A. (eds) Magnonics. Vol. 125 of Topics in Applied Physics. Berlin: Springer, 2013. P. 101–115. DOI: 10.1007/978-3-642-30247-3_8.
45. Сахаров В. К., Хивинцев Ю. В., Дудко Г. М., Джумалиев А. С., Высоцкий С. Л., Стогний А. И., Филимонов Ю. А. Особенности распространения спиновых волн в магнетонных кристаллах с неоднородным распределением намагниченности по толщине // ФТТ. 2022. Т. 64, № 9. С. 1255–1262. DOI: 10.21883/ФТТ.2022.09.52815.11НН.
46. Бугаев А. С., Галкин О. Л., Гуляев Ю. В., Зильберман П. Е. Увлечение электронов магнитостатической волной в слоистой структуре феррит-металл // Письма в ЖТФ. 1982. Т. 8, № 8. С. 485–488.
47. Веселов А. Г., Высоцкий С. Л., Казаков Г. Т., Сухарев А. Г., Филимонов Ю. А. Поверхностные магнитостатические волны в металлизированных пленках ЖИГ // Радиотехника и электроника. 1994. Т. 39, № 12. С. 2067–2074.
48. Филимонов Ю. А., Хивинцев Ю. В. Взаимодействие поверхностной магнитостатической и объемных упругих волн в металлизированной структуре ферромагнетик-диэлектрик // Радиотехника и электроника. 2002. Т. 47, № 8. С. 1002–1007.
49. Сахаров В. К., Хивинцев Ю. В., Высоцкий С. Л., Стогний А. И., Дудко Г. М., Филимонов Ю. А. Влияние мощности входного сигнала на распространение поверхностных магнитостатических волн в пленках железо-иттриевого граната на подложках кремния // Известия вузов. ПНД. 2017. Т. 25, № 1. С. 35–51. DOI: 10.18500/0869-6632-2017-25-1-35-51.

References

1. Kajiwara Y, Harii K, Takahashi S, Ohe J, Uchida K, Mizuguchi M, Umezawa H, Kawai H, Ando K, Takanashi K, Maekawa S, Saitoh E. Transmission of electrical signals by spin-wave interconversion in a magnetic insulator. *Nature*. 2010;464(7286):262–266. DOI: 10.1038/nature08876.
2. Sinova J, Valenzuela SO, Wunderlich J, Back CH, Jungwirth T. Spin Hall effects. *Rev. Mod. Phys.* 2015;87(4):1213–1260. DOI: 10.1103/RevModPhys.87.1213.
3. Althammer M. Pure spin currents in magnetically ordered insulator/normal metal heterostructures. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2018;51(31):313001. DOI: 10.1088/1361-6463/aaca89.

4. Brataas A, van Wees B, Klein O, de Loubens G, Viret M. Spin insulatronics. *Physics Reports*. 2020;885:1–27. DOI: 10.1016/j.physrep.2020.08.006.
5. Sandweg CW, Kajiwara Y, Ando K, Saitoh E, Hillebrands B. Enhancement of the spin pumping efficiency by spin wave mode selection. *Appl. Phys. Lett.* 2010;97(25):252504. DOI: 10.1063/1.3528207.
6. Chumak AV, Serga AA, Jungfleisch MB, Neb R, Bozhko DA, Tiberkevich VS, Hillebrands B. Direct detection of magnon spin transport by the inverse spin Hall effect. *Appl. Phys. Lett.* 2012;100(8):082405. DOI: 10.1063/1.3689787.
7. Balinsky M, Ranjbar M, Haidar M, Dürrenfeld P, Khartsev S, Slavin A, Åkerman J, Dumas RK. Spin pumping and the inverse spin-hall effect via magnetostatic surface spin-wave modes in Yttrium-Iron garnet/platinum bilayers. *IEEE Magn. Lett.* 2015;6:3000604. DOI: 10.1109/LMAG.2015.2471276.
8. Iguchi R, Ando K, Qiu Z, An T, Saitoh E, Sato T. Spin pumping by nonreciprocal spin waves under local excitation. *Appl. Phys. Lett.* 2013;102(2):022406. DOI: 10.1063/1.4775685.
9. d’Allivy Kelly O, Anane A, Bernard R, Ben Youssef J, Hahn C, Molpeceres AH, Carrétéro C, Jacquet E, Deranlot C, Bortolotti P, Lebourgeois R, Mage JC, de Loubens G, Klein O, Cros V, Fert A. Inverse spin Hall effect in nanometer-thick yttrium iron garnet/Pt system. *Appl. Phys. Lett.* 2013;103(8):082408. DOI: 10.1063/1.4819157.
10. Uchida K, Xiao J, Adachi H, Ohe J, Takahashi S, Ieda J, Ota T, Kajiwara Y, Umezawa H, Kawai H, Bauer GEW, Maekawa S, Saitoh E. Spin Seebeck insulator. *Nature Materials*. 2010;9(11):894–897. DOI: 10.1038/nmat2856.
11. Agrawal M, Vasyuchka VI, Serga AA, Kirihara A, Pirro P, Langner T, Jungfleisch MB, Chumak AV, Papaioannou ET, Hillebrands B. Role of bulk-magnon transport in the temporal evolution of the longitudinal spin-Seebeck effect. *Phys. Rev. B*. 2014;89(22):224414. DOI: 10.1103/PhysRevB.89.224414.
12. Sandweg CW, Kajiwara Y, Chumak AV, Serga AA, Vasyuchka VI, Jungfleisch MB, Saitoh E, Hillebrands B. Spin pumping by parametrically excited exchange magnons. *Phys. Rev. Lett.* 2011;106(21):216601. DOI: 10.1103/PhysRevLett.106.216601.
13. Kurebayashi H, Dzyapko O, Demidov VE, Fang D, Ferguson AJ, Demokritov SO. Controlled enhancement of spin-current emission by three-magnon splitting. *Nature Materials*. 2011;10(9):660–664. DOI: 10.1038/nmat3053.
14. Kurebayashi H, Dzyapko O, Demidov VE, Fang D, Ferguson AJ, Demokritov SO. Spin pumping by parametrically excited short-wavelength spin waves. *Appl. Phys. Lett.* 2011;99(16):162502. DOI: 10.1063/1.3652911.
15. Manuilov SA, Du CH, Adur R, Wang HL, Bhallamudi VP, Yang FY, Hammel PC. Spin pumping from spinwaves in thin film YIG. *Appl. Phys. Lett.* 2015;107(4):042405. DOI: 10.1063/1.4927451.
16. Tveten EG, Brataas A, Tserkovnyak Y. Electron-magnon scattering in magnetic heterostructures far out of equilibrium. *Phys. Rev. B*. 2015;92(18):180412. DOI: 10.1103/PhysRevB.92.180412.
17. Saitoh E, Ueda M, Miyajima H, Tatara G. Conversion of spin current into charge current at room temperature: Inverse spin-Hall effect. *Appl. Phys. Lett.* 2006;88(18):182509. DOI: 10.1063/1.2199473.
18. Maekawa S, Adachi H, Uchida K, Ieda J, Saitoh E. Spin current: Experimental and theoretical aspects. *J. Phys. Soc. Jpn.* 2013;82(10):102002. DOI: 10.7566/JPSJ.82.102002.
19. Van Hove L. The occurrence of singularities in the elastic frequency distribution of a crystal. *Phys. Rev.* 1953;89(6):1189–1193. DOI: 10.1103/PhysRev.89.1189.
20. Damon RW, Eshbach JR. Magnetostatic modes of a ferromagnet slab. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 1961;19(3–4):308–320. DOI: 10.1016/0022-3697(61)90041-5.
21. Nikulin YV, Seleznev ME, Khivintsev YV, Sakharov VK, Pavlov ES, Vysotskii SL, Kozhevnikov AV,

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

- Filimonov YA. EMF generation by propagating magnetostatic surface waves in integrated thin-film Pt/YIG structure. *Semiconductors*. 2020;54(12):1721–1724. DOI: 10.1134/S106378262012026X.
22. Seleznev ME, Nikulin YV, Khivintsev YV, Vysotskii SL, Kozhevnikov AV, Sakharov VK, Dudko GM, Pavlov ES, Filimonov YA. Influence of three-magnon decays on electromotive force generation by magnetostatic surface waves in integral YIG – Pt structures. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*. 2022;30(5):617–643. DOI: 10.18500/0869-6632-003008.
 23. De Wames RE, Wolfram T. Dipole-exchange spin waves in ferromagnetic films. *J. Appl. Phys.* 1970;41(3):987–993. DOI: 10.1063/1.1659049.
 24. Seleznev ME, Nikulin UV, Sakharov VK, Khivintsev UV, Kozhevnikov AV, Vysotskii SL, Filimonov UA. Influence of the resonant interaction of surface magnetostatic waves with exchange modes on the EMF generation in YIG/Pt structures. *Tech. Phys.* 2021;91(10):1504–1508 (in Russian). DOI: 10.21883/JTF.2021.10.51363.136-21.
 25. Nikulin YV, Kozhevnikov AV, Vysotskii SL, Seleznev ME, Khivintsev YV, Filimonov YA. Investigation of the interference of magnetostatic surface waves using the inverse spin Hall effect. *Physics of the Solid State*. 2022;64(9):1284–1288. DOI: 10.21883/PSS.2022.09.54167.21HH.
 26. Gurevich AG, Melkov GA. *Magnetization Oscillations and Waves*. Boca Raton: CRC Press; 1996. 464 p.
 27. Vashkovskii AV, Stalmakhov VS, Sharaevskii YP. *Magnetostatic Waves in High-Frequency Electronics*. Saratov: Saratov University Publishing; 1993. 312 p. (in Russian).
 28. Lvov VS. *Nonlinear Spin Waves*. Moscow: Nauka; 1987. 272 p. (in Russian).
 29. Castel V, Vlietstra N, Ben Youssef J, Van Wees BJ. Platinum thickness dependence of the inverse spin-Hall voltage from spin pumping in a hybrid yttrium iron garnet/platinum system. *Appl. Phys. Lett.* 2012;101(13):132414. DOI: 10.1063/1.4754837.
 30. Castel V, Vlietstra N, Van Wees BJ, Ben Youssef J. Frequency and power dependence of spin-current emission by spin pumping in a thin-film YIG/Pt system. *Phys. Rev. B*. 2012;86(13):134419. DOI: 10.1103/PhysRevB.86.134419.
 31. Jungfleisch MB, Chumak AV, Kehlberger A, Lauer V, Kim DH, Onbasli MC, Ross CA, Kläui M, Hillebrands B. Thickness and power dependence of the spin-pumping effect in Y3Fe5O12/Pt heterostructures measured by the inverse spin Hall effect. *Phys. Rev. B*. 2015;91(13):134407. DOI: 10.1103/PhysRevB.91.134407.
 32. Watanabe S, Hirobe D, Shiomi Y, Iguchi R, Daimon S, Kameda M, Takahashi S, Saitoh E. Generation of megahertz-band spin currents using nonlinear spin pumping. *Scientific Reports*. 2017;7(1):4576. DOI: 10.1038/s41598-017-04901-4.
 33. Ando K, Saitoh E. Spin pumping driven by bistable exchange spin waves. *Phys. Rev. Lett.* 2012;109(2):026602. DOI: 10.1103/PhysRevLett.109.026602.
 34. Khivintsev YV, Filimonov YA, Nikitov SA. Spin wave excitation in yttrium iron garnet films with micron-sized antennas. *Appl. Phys. Lett.* 2015;106(5):052407. DOI: 10.1063/1.4907626.
 35. Nur Kholid F, Hamara D, Terschanski M, Mertens F, Bossini D, Cinchetti M, McKenzie-Sell L, Patchett J, Petit D, Cowburn R, Robinson J, Barker J, Ciccarelli C. Temperature dependence of the picosecond spin Seebeck effect. *Appl. Phys. Lett.* 2021;119(3):032401. DOI: 10.1063/5.0050205.
 36. Mednikov AM. Nonlinear effects under the propagation of surface spin waves in YIG films. *Soviet Physics, Solid State*. 1981;23(1):242–245 (in Russian).
 37. Temiryazev AG. The mechanism of transformation of magnetostatic surface waves in the conditions of three-magnon decay. *Soviet Physics, Solid State*. 1987;29(2):313–319 (in Russian).
 38. Polzikova NI, Raevskii AO, Temiryazev AG. Influence of exchange interaction on boundary of three-magnon decay of Damon-Eshbach wave in YIG thin films. *Soviet Physics, Solid State*. 1984;26(11):3506–3508 (in Russian).

39. Kazakov GT, Kozhevnikov AV, Filimonov YA. Four-magnon decay of magnetostatic surface waves in yttrium iron garnet films. *Physics of the Solid State*. 1997;39(2):288–295. DOI: 10.1134/1.1129801.
40. 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.
41. Gulyaev YV, Bugaev AS, Zil'berman PE, Ignat'ev IA, Konovalov AG, Lugovskoi AV, Mednikov AM, Nam BP, Nikolaev EI. Giant oscillations in the transmission of quasi-surface spin waves through a thin yttrium-iron garnet (YIG) film. *JETP Lett.* 1979;30(9):565–568.
42. Gulyaev YV, Zil'berman PE, Lugovskoi AV. Influence of nonuniform exchange and dissipation on propagation of surface Damon-Eshback waves in ferromagnetic plate. *Soviet Physics, Solid State*. 1981;23(4):1136–1142 (in Russian).
43. Donahue MJ, Porter DG. OOMMF User's Guide. Interagency Report NISTIR 6376. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology; 1999. 94 p. DOI: 10.6028/NIST.IR.6376.
44. Dvornik M, Au Y, Kruglyak VV. Micromagnetic Simulations in Magnonics. In: Demokritov S, Slavin A, editors. *Magnonics*. Vol. 125 of Topics in Applied Physics. Berlin: Springer; 2013. P. 101–115. DOI: 10.1007/978-3-642-30247-3_8.
45. Sakharov VK, Khivintsev YV, Dudko GM, Dzhumaliev AS, Vysotskii SL, Stognij AI, Filimonov YA. Particularities of spin wave propagation in magnonic crystals with nonuniform magnetization distribution across the thickness. *Physics of the Solid State*. 2022;64(9):1247–1254. DOI: 10.21883/PSS.2022.09.54160.11HH.
46. Bugaev AS, Galkin OL, Gulyaev YV, Zilberman PE. Electrons' drag by magnetostatic wave in a layered ferrite-metal structure. *Sov. Tech. Phys. Lett.* 1982;8(8):485–488 (in Russian).
47. Veselov AG, Vysotsky SL, Kazakov GT, Sukharev AG, Filimonov YA. Magnetostatic surface waves in metallized YIG films. *J. Commun. Technol. Electron.* 1994;39(12):2067–2074 (in Russian).
48. Filimonov YA, Khivintsev YV. Interaction of magnetostatic surface and elastic volume waves in a metallized structure ferromagnet-dielectric. *J. Commun. Technol. Electron.* 2002;47(8):1002–1007 (in Russian).
49. Sakharov VK, Khivintsev YV, Vysotskii SL, Stognij AI, Dudko GM, Filimonov YA. Influence of input signal power on magnetostatic surface waves propagation in yttrium-iron garnet films on silicon substrates. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*. 2017;25(1):35–51. DOI: 10.18500/0869-6632-2017-25-1-35-51.



Селезнёв Михаил Евгеньевич — родился в г. Заречном (1994), окончил факультет нано- и био-медицинских технологий (СГУ, 2017) и аспирантуру (СГУ, 2022). Работает в Саратовском филиале ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН в должности младшего научного сотрудника. Профессиональные интересы: магноника и спинтроника, магнитные материалы, физика полупроводников, физика твердого тела. Имеет ряд публикаций по указанным направлениям.

Россия, 410019 Саратов, ул. Зеленая, 38
 Саратовский филиал Института радиотехники и электроники
 им. В. А. Котельникова РАН
 E-mail: mixanich94@mail.ru
 ORCID: 0000-0002-7359-3201
 AuthorID (eLibrary.Ru): 1031873

*Селезнёв М. Е., Никулин Ю. В., Хивинцев Ю. В., Высоцкий С. Л.,
 Кожевников А. В., Сахаров В. К., Дудко Г. М., Филимонов Ю. А.*
 Известия вузов. ПНД, 2023, т. 31, № 2

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.



Россия, 410019 Саратов, ул. Зеленая, 38
Саратовский филиал Института радиотехники и электроники
им. В. А. Котельникова РАН
Россия, 410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский национальный исследовательский государственный
университет имени Н. Г. Чернышевского
E-mail: yvnikulin@gmail.com
ORCID: 0000-0003-2957-5468
AuthorID (eLibrary.Ru): 168029

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.



Россия, 410019 Саратов, ул. Зеленая, 38
Саратовский филиал Института радиотехники и электроники
им. В. А. Котельникова РАН
Россия, 410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский национальный исследовательский государственный
университет имени Н. Г. Чернышевского
E-mail: khivintsev@gmail.com
AuthorID (eLibrary.Ru): 39882

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.



Россия, 410019 Саратов, ул. Зеленая, 38
Саратовский филиал Института радиотехники и электроники
им. В. А. Котельникова РАН
Россия, 410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский национальный исследовательский государственный
университет имени Н. Г. Чернышевского
E-mail: vysotsl@gmail.com
ORCID: 0000-0003-3151-9297
AuthorID (eLibrary.Ru): 27015

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.



Россия, 410019 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
AuthorID (eLibrary.Ru): 27013



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

Россия, 410019 Саратов, ул. Зеленая, 38
Саратовский филиал Института радиотехники и электроники
им. В. А. Котельникова РАН
Россия, 410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский национальный исследовательский государственный
университет имени Н. Г. Чернышевского
E-mail: valentin@sakharov.info
ORCID: 0000-0001-7168-1198
AuthorID (eLibrary.Ru): 818546



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 магнито-статических волн, микромагнитное моделирование динамики намагниченности в ферромагнитных нано- и микроструктурах. Имеет более 30 научных публикаций.

Россия, 410019 Саратов, ул. Зеленая, 38
Саратовский филиал Института радиотехники и электроники
им. В. А. Котельникова РАН
E-mail: dugal_2010@hotmail.com
ORCID: 0000-0002-7083-4399
AuthorID (eLibrary.Ru): 39883



Филимонов Юрий Александрович — родился в Куйбышеве (1955). Окончил факультет физической и квантовой электроники МФТИ (1979). Доктор физико-математических наук (2008), профессор по специальности «Физика магнитных явлений» (2012). Директор Саратовского филиала Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН. Профессиональные интересы: магнетроника и спинтроника, магнитные материалы и структуры, электронная компонентная база. Имеет более 120 публикаций.

Россия, 410019 Саратов, ул. Зеленая, 38
Саратовский филиал Института радиотехники и электроники
им. В. А. Котельникова РАН
Россия, 410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский национальный исследовательский государственный
университет имени Н. Г. Чернышевского
E-mail: fil@soire.renet.ru
ORCID: 0000-0002-2645-6669
AuthorID (eLibrary.Ru): 18696

*Селезнёв М. Е., Никулин Ю. В., Хивинцев Ю. В., Высоцкий С. Л.,
Кожевников А. В., Сахаров В. К., Дудко Г. М., Филимонов Ю. А.*
Известия вузов. ПНД, 2023, т. 31, № 2