

Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2026. Т. 34, № 5
Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Applied Nonlinear Dynamics. 2026;34(5)

Научная статья
УДК 537.86

DOI: 10.18500/0869-6632-003234
EDN: KLVMCA

Спиновая накачка поверхностными магнитостатическими волнами в структуре Pt/ЖИГ/SiO₂/Si

М. Е. Селезнев^{1,2}✉, Ю. В. Никулин^{1,2}, Г. М. Дудко¹, В. К. Сахаров^{1,2,4},
Ю. В. Хивинцев^{1,2}, А. В. Кожевников¹, С. Л. Высоцкий^{1,2}, Г. М. Амаханов^{1,2},
Н. Н. Новицкий³, А. И. Серокурова³, 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

³Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению,
Минск, Республика Беларусь

⁴АО «Микроволновые системы», Саратов, Россия

E-mail: ✉mixanich94@mail.ru, yvnikulin@gmail.com, dugal_2010@hotmail.com, valentin@sakharov.info,
khivintsev@gmail.com, kzhavl@gmail.com, vysotsl@gmail.com, agm.05@yandex.ru,
novitski@iftp.bas-net.by, aleksa.serokurova@yandex.by, yuri.a.filimonov@gmail.com

Поступила в редакцию 11.06.2026, принята к публикации 25.08.2026,

опубликована онлайн 1.09.2026, опубликована 30.09.2026

Аннотация. Цель работы — сравнительный анализ эффектов генерации спинового тока в структурах ЖИГ/Pt на основе поликристаллических и эпитаксиальных пленок ЖИГ. Экспериментально исследовались эффекты магнитосопротивления, обусловленные спиновым эффектом Холла (СХМС), и спиновой накачки бегущими поверхностными магнитостатическими волнами (ПМСВ) в микроструктуре Pt(4 нм)/ЖИГ(600 нм) на основе поликристаллической пленки ЖИГ, полученной ионным распылением на подложке SiO₂(100 нм)/Si. Результаты измерений сопоставлены со случаем структуры Pt(4 нм)/ЖИГ(900 нм), полученной на основе эпитаксиальной пленки ЖИГ. Методы. Эксперименты по измерению СХМС выполнялись с холловскими мостиками при пропускании постоянного тока. Спиновая накачка изучалась в макетах типа линии задержки на ПМСВ на основе микроструктур ЖИГ/Pt. Исследовались амплитудно-частотные характеристики коэффициентов передачи и отражения и частотные зависимости ЭДС $V(f)$, наводимой в Pt элементе за счет обратного спинового эффекта Холла (ОСЭХ). Результаты. Показано, что значения СХМС в структурах оказываются одного порядка величины, что отражает близость намагниченности насыщения образцов 1750 Гс и 1432 Гс. При этом значения ЭДС, генерируемые в структурах при распространении ПМСВ за счет ОСЭХ, для структуры на основе эпитаксиальной пленки ЖИГ оказываются почти на два порядка выше. Такое расхождение значений ЭДС связывается с низким микроструктурным совершенством пленки ЖИГ(600 нм)/SiO₂(100 нм)/Si из-за дефектов роста, что проявляется в значении ширины линии ФМР $\Delta H \sim 56$ Э — более чем в 40 раз выше значения ΔH в эпитаксиальной пленке ЖИГ. Большие значения ΔH снижают амплитуду и увеличивают затухание возбуждаемых ПМСВ, что непосредственно сказывается на степени отклонения спиновой системы в ЖИГ от равновесного состояния при заданном уровне падающей СВЧ-мощности накачки. Заключение. Изучены особенности механизма генерации спинового тока в структуре ЖИГ/Pt, изготовленной на полупроводниковой подложке SiO₂/Si. Полученные результаты представляют интерес для разработки на основе поликристаллических пленок ЖИГ энергоэффективной элементной базы на принципах магнотонной спинтроники.

Ключевые слова: спинтроника, спиновый ток, обратный спиновый эффект Холла, спиновые волны, структура ЖИГ/Pt, эпитаксиальные и поликристаллические пленки ЖИГ.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания.

Для цитирования: Селезнев М. Е., Никулин Ю. В., Дудко Г. М., Сахаров В. К., Хивинцев Ю. В., Кожевников А. В., Высоцкий С. Л., Амаханов Г. М., Новицкий Н. Н., Серокурова А. И., Филимонов Ю. А. Спиновая накачка поверхностными магнитостатическими волнами в структуре Pt/ЖИГ/SiO₂/Si // Известия вузов. ПНД. 2026. Т. 34, № 5. С. 735–751. DOI: 10.18500/0869-6632-003234. EDN: KLVMSA

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

Article

DOI: 10.18500/0869-6632-003234

Spin pumping by surface magnetostatic waves in the Pt/YIG/SiO₂/Si structure

M. E. Seleznev^{1,2}✉, Y. V. Nikulin^{1,2}, G. M. Dudko¹, V. K. Sakharov^{1,2,4},
Y. V. Khivintsev^{1,2}, A. V. Kozhevnikov¹, S. L. Vysotskii^{1,2}, G. M. Amakhanov^{1,2},
N. N. Novitsky³, A. I. Serokurova³, Y. A. Filimonov^{1,2}

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

²Saratov State University, Russia

³Scientific and Practical Materials Research Center National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, Republic of Belarus

⁴JSC Microwave Systems, Saratov, Russia

E-mail: ✉mixanich94@mail.ru, yvnikulin@gmail.com, dugal_2010@hotmail.com, valentin@sakharov.info,
khivintsev@gmail.com, kzhavl@gmail.com, vysotsl@gmail.com, agm.05@yandex.ru,
novitski@iftp.bas-net.by, aleksa.serokurova@yandex.by, yuri.a.filimonov@gmail.com

Received 11.06.2026, accepted 25.08.2026, available online 1.09.2026, published 30.09.2026

Abstract. The purpose of this work is to experimentally investigate the spin Hall effect magnetoresistance (SHE) and, using the inverse spin Hall effect (ISHE), spin pumping by traveling surface magnetostatic waves (MSSW) in the Pt(4 nm)/YIG(600 nm) microstructure based on a polycrystalline YIG film obtained by ion sputtering on a SiO₂(100 nm)/Si substrate. The measurement results are compared with the case of the Pt(4 nm)/YIG(900 nm) structure obtained on the basis of an epitaxial YIG film. **Methods.** The experiments were performed with a MSSW delay line layout based on the YIG/Pt microstructure. The amplitude-frequency characteristics of the transmission and reflection coefficients and the frequency dependences of the EMF $V(f)$ induced in the Pt element due to the ISHE were studied. **Results.** It is shown that the values of the SHE in the structures are of the same order of magnitude, which reflects the proximity of the saturation magnetization of the samples of 1750 G and 1432 G. At the same time, the values of the EMF generated in the structures during the propagation of the MSSWs due to the inverse spin Hall effect are almost two orders of magnitude higher for the structure based on the epitaxial YIG film. This discrepancy in the EMF values is associated with the low microstructural perfection of the YIG (600 nm)/SiO₂ (100 nm)/Si film due to growth defects, which is manifested in the FMR linewidth $\Delta H \sim 56$ Oe, more than 40 times higher than the ΔH value in the epitaxial YIG film. Large values of ΔH reduce the amplitude and increase the attenuation of the excited MSSWs. **Conclusion.** The feasibility of spin pumping in a YIG/Pt structure fabricated on a SiO₂/Si semiconductor substrate is demonstrated. The results are of interest for the development of energy-efficient components based on magnonic spintronics principles.

Keywords: spintronics, spin current, inverse spin Hall effect, spin waves, YIG/Pt structure, epitaxial and polycrystalline YIG films.

Acknowledgements. The work was carried out within the framework of a state assignment.

For citation: Seleznev ME, Nikulin YV, Dudko GM, Sakharov VK, Khivintsev YV, Kozhevnikov AV, Vysotskii SL, Amakhanov GM, Novitsky NN, Serokurova AI, Filimonov YA. Spin pumping by surface magnetostatic waves in the Pt/YIG/SiO₂/Si structure. Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics. 2026;34(5):735–751. DOI: 10.18500/0869-6632-003234

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

Селезнев М. Е., Никулин Ю. В., Дудко Г. М., Сахаров В. К., Хивинцев Ю. В., Кожевников А. В.,
Высоцкий С. Л., Амаханов Г. М., Новицкий Н. Н., Серокурова А. И., Филимонов Ю. А.

Введение

Исследование эффектов генерации и детектирования чисто спинового тока (потока спинового углового момента) в гетероструктурах на основе магнитных диэлектриков и металлов с сильным спин-орбитальным взаимодействием представляет интерес для построения энергоэффективной электронной компонентной базы на принципах магнонной спинтроники [1,2]. Как правило, для изготовления таких структур используются пленки железо-иттриевого граната (ЖИГ) [3], которые обладают не только свойствами диэлектрика, но и рекордно низким параметром диссипации и, по сути, прозрачны для передачи спинового углового момента. В качестве пленок тяжелого металла наиболее широко используются пленки платины (Pt), для которых стандартными вакуумными технологиями удается создавать высокое качество интерфейса, обеспечивающего обменное взаимодействие электронов платины с магнитными ионами в ЖИГ, и получать эффективное преобразование зарядовых и спиновых токов за счет прямого и обратного спинового (ОСЭХ) эффекта Холла [4,5].

Типичная геометрия эксперимента по спиновой накачке в тонкопленочных структурах ЖИГ/Pt предполагает, что внешнее магнитное поле $\vec{H}$ лежит в плоскости структуры. При этом инжекция спинового тока $\vec{J}_s$ из ЖИГ в пленку Pt может создаваться в условиях возбуждения мод ферромагнитного резонанса (ФМР) [6], а также бегущих обратных объемных (ООМСВ) [7] и поверхностных (ПМСВ) магнитостатических волн [8]. Детектирование спинового тока на частоте накачки f осуществляется с помощью ОСЭХ, приводящего к появлению на концах пленки Pt сигнала ЭДС $V(f) \sim \theta_H J_s(f) R$, где θ_H — спиновый угол Холла и R — сопротивление пленки Pt. При этом величина J_s через единицу поверхности пропорциональна числу $\sum$ каналов рассеяния электронов Pt на магнонах, которое определяется числом магнитных ионов Fe на интерфейсе ЖИГ/Pt, интенсивностью ν процессов электрон-магнонного рассеяния в каждом из каналов и степени отклонения магнонной подсистемы от равновесного состояния, которая здесь задается мощностью ПМСВ P : $J_s \sim \sum \nu P$. К параметрам магнонной подсистемы, определяющим ν , относят плотность состояний (DOS) в спектре спиновых волн $g(\omega = 2\pi f)$ [9]: $\Upsilon \sim \int \Omega(\omega) \cdot g(\omega) d\omega$, где $\Omega(\omega)$ содержит статистический коэффициент, характеризующий распределение магнонов и электронов, и информацию о скоростях неупругих переходов с участием возбужденных магнонов на частоте Ω . В экспериментах по спиновой накачке бегущими ПМСВ и ООМСВ было показано [10–18], что максимальная эффективность генерации J_s наблюдается на частотах Ω , где в DOS возникают сингулярности ван Хофа (VHS) ($g(\Omega) \rightarrow \infty$) [19]. Отметим, что спиновый транспорт в структурах Pt/ЖИГ в основном исследовался для структур на основе эпитаксиальных пленок ЖИГ, выращенных на монокристаллических подложках гадолиний-галлиевого граната (ГТГ). Такие пленки ЖИГ характеризуются очень малой шероховатостью поверхности и высоким микроструктурным совершенством, низким значением параметра диссипации спиновых волн (СВ) и обеспечивают эффективную передачу спинового углового момента через интерфейс Pt/ЖИГ. Однако с точки зрения расширения возможностей для разработки устройств магнонной спинтроники представляет интерес исследование эффектов спиновой накачки в структурах Pt/ЖИГ на основе поликристаллических пленок ЖИГ. Кроме того, поскольку поликристаллические пленки ЖИГ могут быть выращены на широком классе подложек, в том числе и полупроводниковых [20–22], такие структуры могут быть интересны и с точки зрения интеграции магнонных устройств с полупроводниковыми технологиями. Действительно, в пленках ЖИГ, полученных ионно-лучевым распылением на подложках $\text{SiO}_2(100 \text{ нм})/\text{Si}$, наблюдались эффекты распространения ПМСВ [23,24] и магнитоупругих волн [25]. На примере структур ЖИГ/GaAs была показана возможность управления дисперсией ПМСВ за счет изменения проводимости GaAs при облучении светом [26]. Кроме того, в структурах типа Pt/ЖИГ/Si [27] и Co,Fe/ЖИГ/Si [28] изучался

спиновый эффект Зеебека, а также исследовалась спиновая накачка [27,29] и магнитосопротивление, обусловленное спиновым эффектом Холла (СХМС) [30]. Эффекты генерации спинового тока бегущими спиновыми волнами в структурах Pt/ЖИГ/Si, по-видимому, не изучались. Цель данной работы — экспериментально исследовать спиновую накачку бегущими ПМСВ и СХМС в структуре Pt/ЖИГ/SiO₂/Si и сопоставить с аналогичными измерениями для структуры на основе пленки ЖИГ, выращенной методом жидкофазной эпитаксии на подложке ГТГ.

1. Методика

Эксперименты выполнялись с двумя типами структур Pt/ЖИГ на основе пластин размером 15 мм×15 мм из пленок ЖИГ, выращенных методом ионного распыления [20] на подложке SiO₂(100 нм)/Si (структура I) и методом жидкофазной эпитаксии на подложке ГТГ(111) (структура II). Для экспериментов по спиновой накачке на поверхности пластин методами магнетронного распыления, фотолитографии и ионного травления были сформированы пары полосковых микроантенн (МА) с пленками Pt между ними, см. рис. 1, а. Каждый образец содержал набор структур Pt/ЖИГ-МА с расстоянием между МА $S = 244$ мкм и пленками Pt толщиной 4 нм, шириной 200 мкм и длиной 230 мкм. МА с контактными площадками (обозначены на рис. 1 римскими I и II) для подключения СВЧ-микрозондов, а также контакты к Pt изготавливались на одном технологическом этапе из меди толщиной 0.5 мкм. МА имели длину $l = 250$ мкм и ширину $w = 4$ мкм. Образцы помещались в зазор электромагнита так, что касательное магнитное поле H было направлено вдоль МА, что отвечало возбуждению ПМСВ с волновым вектором $k \perp H$. Характеристики ПМСВ измерялись с помощью векторного анализатора цепей. Измерялись спектры передачи $S_{12}(f)$, отражения $S_{11}(f)$, коэффициент преобразования $K(f)$ падающей мощности P_{in} в мощность МСВ P . Частотные зависимости ЭДС $V_{ISHE}(f)$ измерялись в режиме

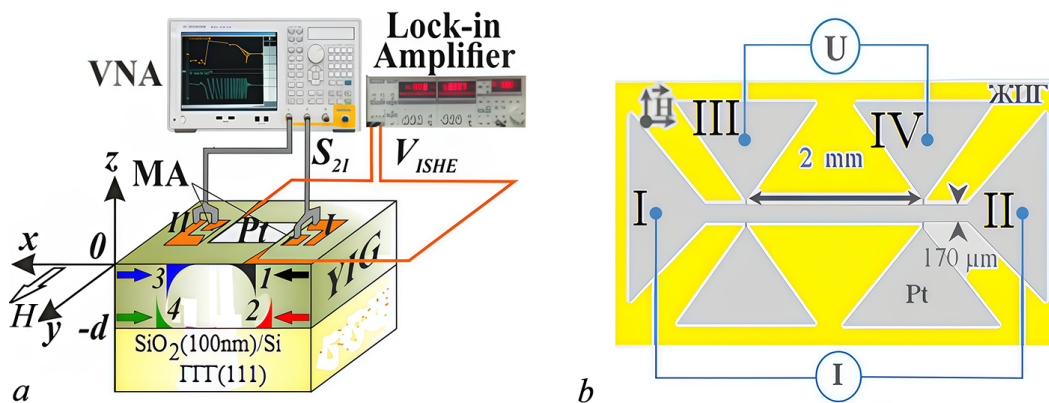


Рис. 1. Схема эксперимента и структура ЖИГ/Pt: а — эксперимент по исследованию спиновой накачки. Римскими I и II показаны полосковые микроантенны (МА) с контактными площадками для СВЧ-зондов. На вставке цветом показан характер распределения намагниченности дипольной ПМСВ, отвечающий кривым 1–4 на рис. 6. Стрелкой в направлении оси y показано направление магнитного поля H в геометрии ПМСВ. б — Схема измерения СХМС. Измерения проводились при ориентации магнитного поля H параллельно ($H \parallel I$) и перпендикулярно ($H \perp I$) направлению тока (цвет онлайн)

Fig. 1. Experimental setup and YIG/Pt structure: а — spin pumping experiment. Roman I and II indicate microstrip antennas (MAs) with contact pads for microwave probes. The inset shows the color-coded magnetization distribution of the dipole MSSW mode corresponding to curves 1–4 in Fig. 6. The arrow along the y -axis shows the direction of the magnetic field H in the MSSW geometry. б — SMR measurement setup. Measurements were performed with the magnetic field H oriented parallel ($H \parallel I$) and perpendicular ($H \perp I$) to the current direction (color online)

Селезнев М. Е., Никулин Ю. В., Дудко Г. М., Сахаров В. К., Хивинцев Ю. В., Кожевников А. В.,
Высоцкий С. Л., Амаханов Г. М., Новицкий Н. Н., Серокурова А. И., Филимонов Ю. А.

модуляции падающей СВЧ-мощности P_{in} с частотой 11.33 кГц. Магнитное поле менялось в диапазоне 120...1200 Э. Для исследования СХМС методом фотолитографии и ионного травления на поверхности пластин формировались холловские мостики Pt(4 нм)/ЖИГ с медными контактами I, II для подачи постоянного тока $I \sim 100$ мкА и контактами III, IV для измерения напряжения U , см. рис. 1, b.

Магнитные параметры пленок ЖИГ определялись по спектрам ФМР в касательно намагниченных пленках на частоте 9.85 ГГц. Эпитаксиальная пленка ЖИГ имела эффективную намагниченность $4\pi M_{II} \approx 1830$ Гс и ширину линии ФМР $\Delta H_{II}^{\parallel} \approx 1.3$ Э, см. рис. 2, a. Среднеквадратичная амплитуда шероховатости поверхности, измеренной методом зондовой атомно-силовой микроскопии (АСМ), составила $\sigma \approx 0.15$ нм, см. рис. 2, b. Для поликристаллической пленки ЖИГ (структура I) были получены значения $4\pi M_I \approx 1430$ Гс и $\Delta H_{II}^{\parallel} \approx 56$ Э, см. кривую 1 на рис. 2, c. Заметный вклад в ширину линии ФМР дает неоднородность микроструктуры пленки ЖИГ/SiO₂(100 нм)/Si, разброс размеров микрокристаллитов и шероховатость поверхности пленки

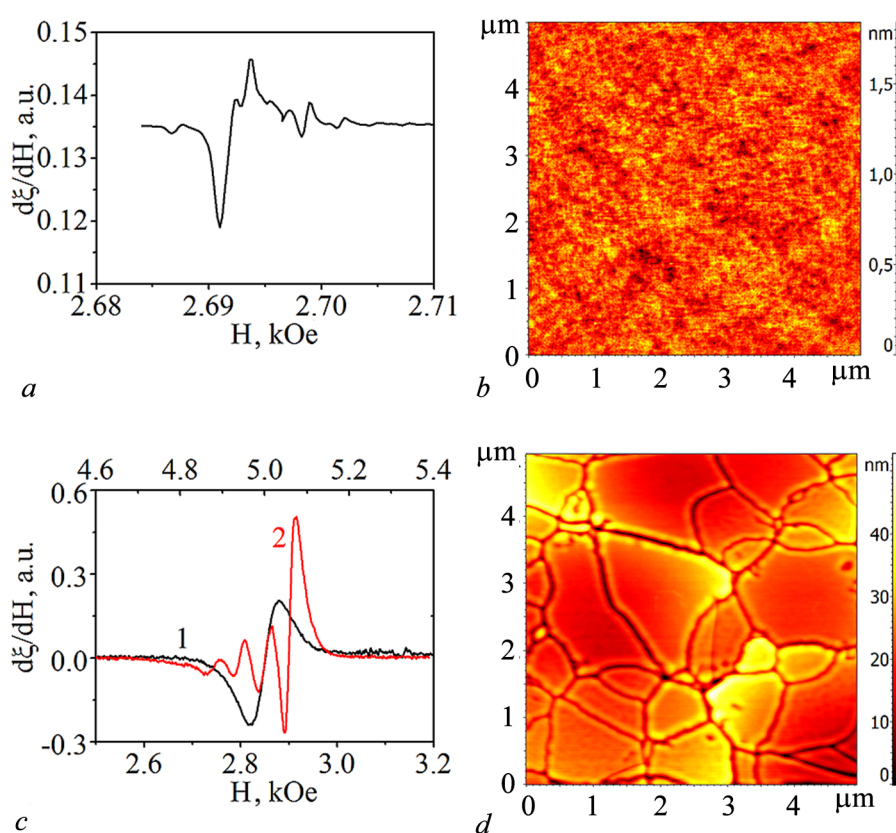


Рис. 2. a, c — Зависимости производной коэффициента поглощения ξ по полю H от величины внешнего касательного к поверхности пленки магнитного поля H , полученные методом ФМР ($f \approx 9.85$ ГГц) для эпитаксиальной (a) и поликристаллической (c) пленок ЖИГ. На рисунке c кривые 1 и 2 отвечают случаям касательного и нормального к поверхности пленки намагничивания. b, d — АСМ-изображения (5×5 мкм²) поверхности эпитаксиальной и поликристаллической пленок ЖИГ, полученные методом сканирующей зондовой микроскопии (цвет онлайн)

Fig. 2. a, c — Dependence of the derivative of the absorption coefficient ξ with respect to the magnetic field H on the magnitude of the external magnetic field H applied tangentially to the film surface, obtained via FMR ($f \approx 9.85$ GHz) for epitaxial (a) and polycrystalline (c) YIG films. In figure c, curves 1 and 2 correspond to magnetization configurations tangential and normal to the film surface, respectively. b, d — AFM images (5×5 μm^2) of the surfaces of epitaxial and polycrystalline YIG films, obtained using scanning probe microscopy (color online)

$\sigma \approx 6.5$ нм, см. рис. 2, *d*. При этом существенный вклад в $\Delta H_{II}^{\parallel}$ дают процессы двухмагнетонного рассеяния, что подтверждается уменьшением ширины линии ФМР в случае нормального намагничивания до значения $\Delta H_I^{\perp} \approx 24$ Э, см. кривую 2 на рис. 2, *c*. Отметим, что в спектре ФМР в нормально намагниченной пленке (см. кривую 2 на рис. 2, *c*) можно выделить линии поглощения, отвечающие возбуждению пяти мод спин-волнового резонанса при полях $H_n^{\perp}$ 5058, 5001, 4941, 4883, 4810 Э. Зависимость $H_n^{\perp}$ от номера резонанса n близка к линейной, что характерно для пленок ЖИГ с неоднородным распределением эффективной намагниченности по толщине [31].

2. Результаты измерений

На рис. 3, *a, b* приведены результаты измерений СХМС в исследуемых структурах. Можно видеть, что зависимости $R(H)$ имеют аналогичный характер. Величина СХМС $\beta = \delta R/R \cdot 100\%$ для структуры Pt/ЖИГ/Si (см. рис. 3, *a*) составляет $\beta \approx 0.015\%$, тогда как для структуры на основе эпитаксиальной пленки ЖИГ оказывается почти в 2 раза больше $\beta \approx 0.027\%$. Величина магнитного поля, при котором для структуры Pt/ЖИГ/Si наблюдается насыщение зависимостей $R(H)$, составляет $H \approx 200$ Э, что почти на порядок больше, чем для структуры Pt/ЖИГ/ГГГ.

На рис. 4 и рис. 5 приведены частотные зависимости спектров передачи $S_{12}(f)$, отражения $S_{11}(f)$ и ЭДС $U(f)$, измеренные для нескольких значений магнитного поля H для структур Pt/ЖИГ/ГГГ и Pt/ЖИГ/Si соответственно. Зависимости на рис. 4 и рис. 5 имеют схожий характер и в целом отвечают случаю, когда в структурах распространяются ПМСВ [10–17]. Однако в случае структур Pt/ЖИГ/Si из-за больших потерь выходной сигнал сильно ослаблен ($-50 \dots -60$ дБ), что не позволяет измерить набег фазы ПМСВ при расстоянии между антеннами $S = 244$ мкм даже с помощью усилителя 30 дБ. Для пленок Pt/ЖИГ/Si сложность в измерении фазо-частотных характеристик отмечалась в работах [23, 24] для макетов с расстоянием между МА больше 50 мкм.

Чтобы убедиться, что в структуре I возбуждаются и распространяются ПМСВ, методом широкополосного ФМР в структуре Pt/ЖИГ/Si были измерены спектры поглощения. Оказалось, что полоса частот, в которой наблюдается отбор мощности при возбуждении ФМР, при всех значениях полей уже, чем линия поглощения в отраженной мощности $S_{11}(f)$ от входной МА, см. кривую 1 на рис. 5, *b*. Кроме того, смена направления распространения ПМСВ и поверхности

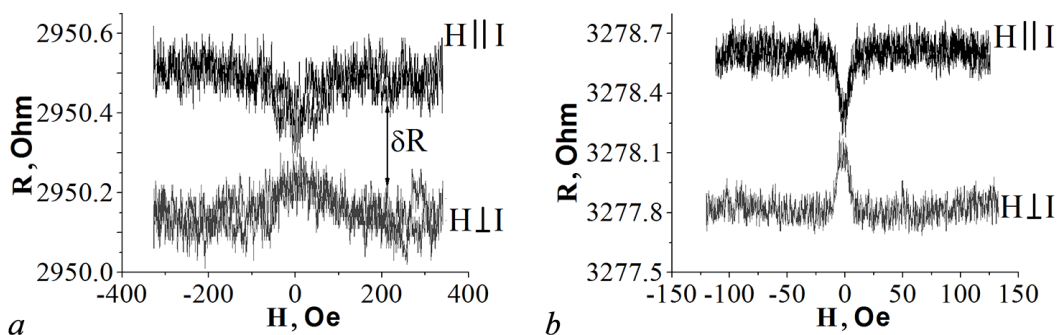


Рис. 3. *a, b* — Магниторезистивные зависимости $R(H)$ в холловских мостиках на основе структур Pt/ЖИГ, сформированных на поликристаллической *a* и эпитаксиальной *b* пленках ЖИГ. Через Pt-элемент пропускался постоянный ток I величиной $I \sim 100$ мкА. Магнитное поле H приложено в плоскости структуры параллельно или перпендикулярно направлению протекания тока I , см. рис. 1, *b*

Fig. 3. *a, b* — Magnetoresistance dependencies $R(H)$ in Hall bridges based on Pt/YIG structures formed on polycrystalline *a* and epitaxial *b* YIG films. A direct current $I \sim 100$ μ A was passed through the Pt element. The magnetic field H was applied in the plane of the structure, either parallel or perpendicular to the direction of the current flow I , see рис. 1, *b*

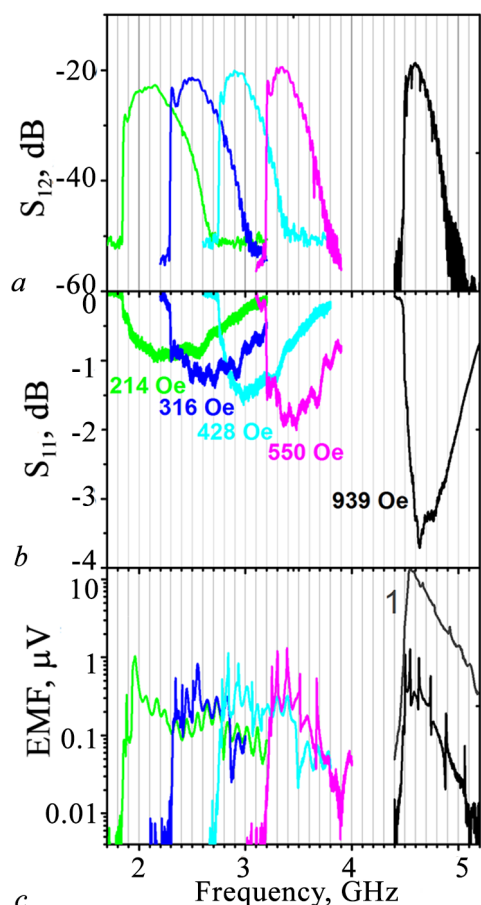


Рис. 4. Спектры передачи $S_{12}(f)$ (a), отражения $S_{11}(f)$ (b) и ЭДС (c), полученные для структуры Pt/ЖИГ/ГТГ. Цифры у кривых отвечают значениям магнитного поля в эрстедах. Зависимости $S_{12}(f)$ и $S_{11}(f)$ измерены при уровне падающей мощности $P_{\text{in}} = -20$ дБм, зависимости ЭДС $U(f)$ (c) получены при $P_{\text{in}} = -5$ дБм и $P_{\text{in}} = 10$ дБм (кривая 1) (цвет онлайн)

Fig. 4. Transmission spectra $S_{12}(f)$ (a), reflection $S_{11}(f)$ (b) and EMF (c) obtained for the Pt/YIG/GGG structure. The numbers near to the curves correspond to the magnetic field values in Oe. The $S_{12}(f)$ and $S_{11}(f)$ dependences were measured at the incident power level $P_{\text{in}} = -20$ dBm, the EMF dependences $U(f)$ (c) were obtained at $P_{\text{in}} = -5$ dBm and $P_{\text{in}} = 10$ dBm (curve 1) (color online)

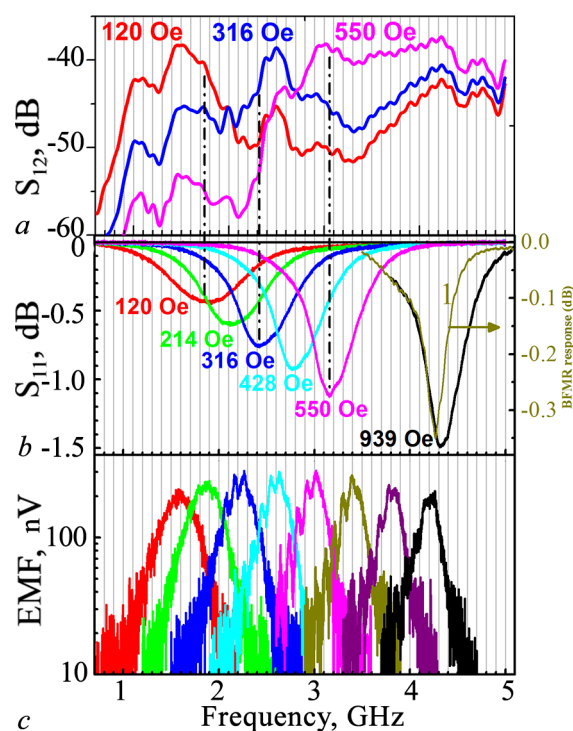


Рис. 5. Спектры передачи $S_{12}(f)$ (a), отражения $S_{11}(f)$ (b) и ЭДС (c), полученные для структуры Pt/ЖИГ/Si. Цифры у кривых отвечают значениям магнитного поля в Э. На b для поля $H = 939$ Э кривой 1 показана зависимость спектра поглощения для широкополосного ФМР. Зависимости $S_{12}(f)$ и $S_{11}(f)$ измерены при уровне падающей мощности $P_{\text{in}} = -20$ дБм, спектры передачи регистрировались с помощью усилителя с коэффициентом усиления 30 дБ. Зависимости ЭДС $U(f)$ (c) получены при $P_{\text{in}} = 10$ дБм (цвет онлайн)

Fig. 5. Transmission spectra $S_{12}(f)$ (a), reflection $S_{11}(f)$ (b) and EMF (c) obtained for the Pt/YIG/Si structure. The numbers near to the curves correspond to the magnetic field values in Oe. In b for the field $H = 939$ Oe, curve 1 shows the dependence of the absorption spectrum for broadband FMR. The dependences $S_{12}(f)$ and $S_{11}(f)$ were measured at the incident power level $P_{\text{in}} = -20$ dBm, the transmission spectra were recorded using an amplifier with a gain of 30 dB. The EMF dependences $U(f)$ (c) were obtained at $P_{\text{in}} = 10$ dBm (color online)

пленки ЖИГ, где амплитуда ПМСВ максимальна (см. вставку к рис. 1, a), в обеих структурах сопровождались аналогичными изменениями, отвечающими невязимному характеру распространения ПМСВ, см. рис. 6. Все сказанное позволяет считать, что ЭДС в структуре I генерируется за счет спиновой накачки бегущими ПМСВ. При этом величина ЭДС при одинаковом уровне падающей мощности в структуре I оказывается в 60 раз меньше, чем в структуре II, см. рис. 4 и рис. 5, b при $H = 939$ Э и одинаковом уровне $P_{\text{in}} = 10$ дБм.

3. Обсуждение полученных результатов

Результаты измерений СХМС и $V_{\text{ISHE}}(f)$ в структурах I и II показывают, что в структуре Pt/ЖИГ/SiO₂/Si значения параметра β и величина ЭДС оказываются соответственно в 2 и более чем в 60 раз меньше аналогичных величин для структуры Pt/ЖИГ/ГГГ. Такое снижение связано с более низким качеством пленок ЖИГ/SiO₂/Si. Действительно, меньшая намагниченность насыщения ЖИГ в структурах I означает, что падает число каналов рассеяния Σ электронов платины на магнитных ионах в ЖИГ. Разброс размеров микрокристаллитов, ростовые дислокации и высокая шероховатость поверхности пленок ЖИГ/SiO₂/Si приводят к росту коэрцитивности и неоднородному состоянию намагниченности на интерфейсе ЖИГ/Pt. Перечисленные факторы снижают эффективность спин-зависимого рассеяния электронов на магнитных ионах на интерфейсе ЖИГ/Pt при измерении параметра β в геометриях эксперимента $H \parallel I$ и $H \perp I$.

Причина, по которой перечисленные факторы в структуре ЖИГ/SiO₂/Si оказывают более сильное влияние на значения ЭДС, чем на величину СХМС, заключается в различии механизма создания спинового тока в экспериментах по измерению СХМС и спиновой накачке. В первом случае спиновый ток $\vec{j}_s$ возникает за счет спинового эффекта Холла при пропускании электрического тока $\vec{j}_c$ через пленку Pt: $j_s \sim \theta_H j_c$. Понятно, что при одной и той же величине тока в структурах I и II разница в значениях j_s будет определяться отличием параметра для исследованных структур θ_H и числом каналов рассеяния Σ на интерфейсе ЖИГ/Pt.

Во втором случае неравновесный спиновый ток в пленке Pt возникает за счет электрон-магнитного рассеяния на интерфейсе и пропорционален мощности ПМСВ на частоте накачки $P(f)$: $J_s \sim \Sigma \Gamma(f) P(f)$. Мощность ПМСВ можно записать в виде [32]: $P(f) \approx [m(f)]^2 V_g(f) dl$, где m — амплитуда намагниченности ПМСВ, V_g — групповая скорость волны, d — толщина ЖИГ, l — апертура МА. С помощью программного пакета ООММФ, распространяемого в свободном доступе [33], было выполнено микромагнитное моделирование распространения ПМСВ в пленке при возбуждении микрополоской при значениях параметра диссипации $\Delta H_1 = 1.3$ Э и $\Delta H_2 = 56$ Э. Полученные результаты моделирования представляли собой временную выборку распределения Фурье-амплитуды волнового поля в пленке, которые затем обрабаты-

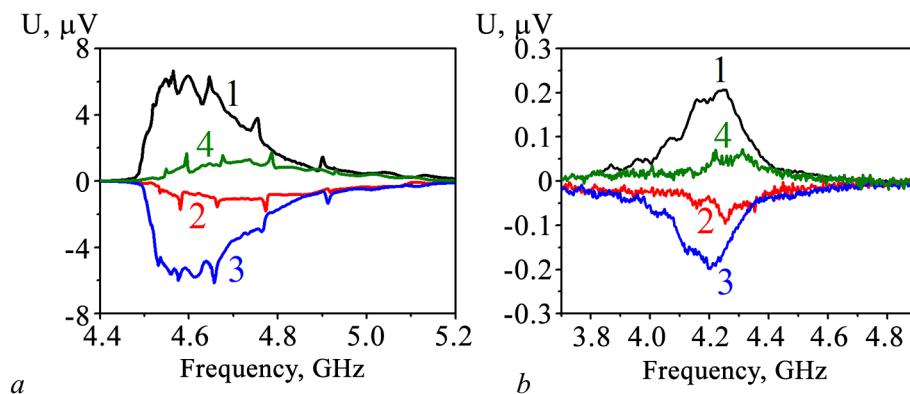


Рис. 6. *a, b* — Частотные зависимости ЭДС, измеренные при $P_{\text{in}} \sim 10$ дБм, $H \sim 939$ Э в структурах Pt/ЖИГ/ГГГ (*a*) и Pt/ЖИГ/SiO₂/Si (*b*). Цвет и номер кривых соответствуют направлению распространения ПМСВ и границам пленки ЖИГ, показанным цифрами 1–4 на рис. 1, *a* (цвет онлайн)

Fig. 6. *a, b* — Frequency dependences of the EMF measured at $P_{\text{in}} \sim 10$ dBm, $H \sim 939$ Oe in the Pt/YIG/GGG (*a*) and Pt/YIG/SiO₂/Si (*b*) structures. The color and number of the curves correspond to the direction of propagation of the MSSW and the boundaries of the YIG film, shown by numbers 1–4 in fig. 1, *a* (color online)

лись путем Фурье-преобразования в программе Semargl [34]. Было получено, что отношение $|m_1(f)|^2/|m_2(f)|^2 \approx \Delta H_2/\Delta H_1 \approx 43$. Именно с этим следует связать существенную разницу в значениях ЭДС для структур I и II.

Обсудим теперь особенности вида частотных зависимостей $V_{\text{ISHE}}(f)$ для структур I и II, показанных на рис. 4, с, 5, с и 6. На рис. 4, с для структуры II для поля $H = 939$ Ое приведены две зависимости $V_{\text{ISHE}}(f)$, отвечающие уровням падающей мощности $P_{\text{in}} = -5$ дБм и $P_{\text{in}} = 10$ дБм. Можно видеть, что при $P_{\text{in}} = -5$ дБм в зависимости $V_{\text{ISHE}}(f)$ наблюдается серия максимумов, обусловленных резонансным взаимодействием ПМСВ с обменными модами, имеющими высокую плотность состояний [10, 11, 13]. По мере роста P_{in} указанные осцилляции сглаживаются (см. рис. 6, а и кривую 1 на рис. 4, с), что связано с развитием 4М неустойчивости, приводящей к неоднородности магнитных параметров в направлении распространения волны и разрушению фазового синхронизма ПМСВ и обменных мод на участке между МА [13]. Отсутствие таких резонансных особенностей в зависимости $V_{\text{ISHE}}(f)$ структуры Pt/ЖИГ/SiO₂/Si следует связать с большим уровнем затухания СВ и невозможностью выполнить условия фазового синхронизма между ПМСВ и обменной модой. Отметим также, что при доступном нам в эксперименте уровне $P_{\text{in}} = 10$ дБм мы не фиксировали развитие параметрических процессов в структуре Pt/ЖИГ/SiO₂/Si.

Заключение

В структурах Pt(4 нм)/ЖИГ(600 нм), полученных ионным распылением слоя ЖИГ на подложках кремния со слоем окисла на поверхности (Pt(4 нм)/ЖИГ(600 нм)/SiO₂(100 нм)/Si), исследованы магнитосопротивление, обусловленное спиновым эффектом Холла (СХМС), и спиновая накачка бегущими поверхностными магнитостатическими волнами (ПМСВ). Результаты измерений сопоставлены со случаем структуры Pt(4 нм)/ЖИГ(900 нм), полученной на основе эпитаксиальной пленки ЖИГ. Показано, что значения СХМС для исследуемых структур оказываются одного порядка величины, что отражает близость намагниченности насыщения образцов 1830 Гс и 1430 Гс. При этом значения ЭДС, генерируемые за счет обратного спинового эффекта Холла при распространении ПМСВ, для структуры на основе эпитаксиальной пленки ЖИГ оказываются почти на два порядка выше. Такое расхождение значений ЭДС связывается с низким микроструктурным совершенством пленки ЖИГ(600 нм)/SiO₂(100 нм)/Si из-за дефектов роста, что проявляется в значении ширины линии ФМР $\Delta H \sim 56$ Э, более чем в 40 раз выше значения ΔH в эпитаксиальной пленке ЖИГ. Большие значения ΔH снижают амплитуду и увеличивают затухание возбуждаемых ПМСВ, что при заданном уровне входного СВЧ-сигнала существенно снижает степень отклонения магнитной системы от равновесного состояния в пленке ЖИГ/Si по сравнению с эпитаксиальной структурой ЖИГ/ГГГ. Полученные результаты раскрывают особенности механизмов создания спинового тока в структурах на основе поликристаллических пленок ЖИГ и представляют интерес для разработки на их основе энергоэффективной элементной базы на принципах магнонной спинтроники.

Список литературы

1. Chumak A. V., Vasyuchka V. I., Serga A. A., Hillebrands B. Magnon spintronics // Nature Phys. 2015. Vol. 11, no. 6. P. 453–461. DOI: 10.1038/nphys3347.
2. Rezende S. M. Fundamentals of Magnonics. Cham: Springer, 2020. 358 p. DOI: 10.1007/978-3-030-41317-0.

3. Wang H. L., Du C. H., Pu Y., Adur R., Hammel P. C., Yang F. Y. Large spin pumping from epitaxial $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ thin films to Pt and W layers // *Phys. Rev. B*. 2013. Vol. 88, no. 10. P. 100406(R). DOI: 10.1103/PhysRevB.88.100406.
4. Hirsch J. E. Spin hall effect // *Phys. Rev. Lett.* 1999. Vol. 83, no. 9. P. 1834–1837. DOI: 10.1103/PhysRevLett.83.1834.
5. Jungwirth T., Wunderlich J., Olejnik K. Spin Hall effect devices // *Nature Mater.* 2012. Vol. 11, no. 5. P. 382–390. DOI: 10.1038/nmat3279.
6. Heinrich B., Burrowes C., Montoya E., Kardasz B., Girt E., Song Y. Y., Wu M. Spin pumping at the magnetic insulator (YIG)/normal metal (Au) interfaces // *Phys. Rev. Lett.* 2011. Vol. 107, no. 6. P. 066604. DOI: 10.1103/PhysRevLett.107.066604.
7. Harii K., An T., Kajiwara Y., Ando K., Nakayama H., Yoshino T., Saitoh E. Frequency dependence of spin pumping in Pt/ $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ film // *J. Appl. Phys.* 2011. Vol. 109, no. 11. P. 116105. DOI: 10.1063/1.3594661.
8. Balinsky M., Ranjbar M., Haidar M., Durrenfeld P., Khartsev S., Slavin A., Dumas R. K. Spin pumping and the inverse spin-hall effect via magnetostatic surface spin-wave modes in Yttrium-Iron garnet/platinum bilayers // *IEEE Magnetics Letters*. 2015. Vol. 6. P. 3000604. DOI: 10.1109/LMAG.2015.2471276.
9. 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.
10. 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.
11. Селезнев М. Е. Детектирование спиновых волн в магнитных микроструктурах YIG/Pt и YIG/n-InSb: дис. ... к. физ.-мат. наук: 2.2.2. Саратов: Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, 2022. 179 с.
12. Селезнев М. Е., Никулин Ю. В., Хивинцев Ю. В., Высоцкий С. Л., Кожевников А. В., Сахаров В. К., 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.
13. Селезнев 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.
14. Никулин Ю. В., Высоцкий С. Л., Селезнев М. Е., Кожевников А. В., Сахаров В. К., Дудко Г. М., Хивинцев Ю. В., Филимонов Ю. А. Частотная зависимость смешанной спиновой проводимости структур YIG|Pt при спиновой накачке ПМСВ // *Физика твердого тела*. 2023. Т. 65, № 6. С. 967–972. DOI: 10.21883/PSS.2023.06.56103.10H.
15. Никулин Ю. В., Хивинцев Ю. В., Селезнев М. Е., Высоцкий С. Л., Сахаров В. К., Кожевников А. В., Филимонов Ю. А. Спиновая накачка в структурах YIG/Pt: роль сингулярностей ван Хофа // *Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики*. 2024. Т. 119, № 9. С. 676–683. DOI: 10.31857/S1234567824090076.
16. Высоцкий С. Л., Никулин Ю. В., Дудко Г. М., Сахаров В. К., Кожевников А. В., Селезнев М. Е., Филимонов Ю. А. Влияние сингулярностей ван Хофа на спиновую накачку в структуре

Селезнев М. Е., Никулин Ю. В., Дудко Г. М., Сахаров В. К., Хивинцев Ю. В., Кожевников А. В.,
Высоцкий С. Л., Амаханов Г. М., Новицкий Н. Н., Серокурова А. И., Филимонов Ю. А.
Известия вузов. ПНД, 2026, т. 34, № 5

магнетонный кристалл/нормальный металл // Физика твердого тела. 2024. Т. 66, № 7. С. 1068–1074. DOI: 10.61011/FTT.2024.07.58375.38НН.

17. Амаханов Г. М., Селезнев М. Е., Никулин Ю. В., Высоцкий С. Л., Сахаров В. К., Дудко Г. М., Кожевников А. В., Хивинцев Ю. В., Филимонов Ю. А. Спиновая накачка поверхностными магнитостатическими волнами в микроструктурах на основе плёнок железоиттриевого граната с кристаллографической ориентацией (100) // Известия вузов. Радиофизика. 2025. Т. 68, № 2. С. 167–181. DOI: 10.52452/00213462_2025_68_02_167.
18. Vysotskii S. L., Nikulin Y. V., Dudko G. M., Kozhevnikov A. V., Sakharov V. K., Khivintsev Y. V., Nikitov S. A., Filimonov Y. A. Effects of spin pumping in a yttrium iron garnet–platinum magnonic crystal // Phys. Rev. Applied. 2025. Vol. 23. P. 064035. DOI: 10.1103/lxpw-hqx2.
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. Stognij A. I., Lutsev L. V., Bursian V. E., Novitskii N. N. Growth and spin-wave properties of thin $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ films on Si substrates // Journal of Applied Physics. 2015. Vol. 118, no. 2. P. 023905. DOI: 10.1063/1.4926475.
21. Lutsev L. V., Stognij A. I., Novitskii N. N., Bursian V. E., Maziewski A., Gieniusz R. Magnetic properties, spin waves and interaction between spin excitations and 2D electrons in interface layer in $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}/\text{AlO}_x/\text{GaAs}$ -heterostructures // J. Phys. D: Appl. Phys. 2018. Vol. 51, no. 35. P. 355002. DOI: 10.1088/1361-6463/aad41b.
22. Stognij A., Lutsev L., Novitskii N., Bepalov A., Golikova O., Ketsko V., Gieniusz R., Maziewski A. Synthesis, magnetic properties and spin-wave propagation in thin $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ films sputtered on GaN-based substrates // J. Phys. D: Appl. Phys. 2015. Vol. 48, no. 48. P. 485002. DOI: 10.1088/0022-3727/48/48/485002.
23. Sakharov V. K., Khivintsev Y. V., Vysotskii S. L., Stognij A. I., Filimonov Y. A. Enhanced nonreciprocity of magnetostatic surface waves in yttrium-iron-garnet films deposited on silicon substrates by ion-beam evaporation // IEEE Magnetics Letters. 2017. Vol. 8. P. 3704105. DOI: 10.1109/LMAG.2017.2659638.
24. 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 плёнках 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.
25. Высоцкий С. Л., Никулин Ю. В., Кожевников А. В., Хивинцев Ю. В., Сахаров В. К., Джумалиев А. С., Филимонов Ю. А., Стогний А. И., Никитов С. А. Магнитоупругие свойства пленок железо-иттриевого граната, полученных ионно-лучевым распылением на подложках Si и GaAs // ЖТФ. 2020. Т. 90, № 7. С. 1221–1226. DOI: 10.21883/JTF.2020.07.49460.363-19.
26. Sadovnikov A. V., Beginin E. N., Sheshukova S. E., Sharaevskii Y. P., Stognij A. I., Novitski N. N., Sakharov V. K., Khivintsev Y. V., Nikitov S. A. Route toward semiconductor magnonics: Light-induced spin-wave nonreciprocity in a YIG/GaAs structure // Phys. Rev. B. 2019. Vol. 99, no. 5. P. 054424. DOI: 10.1103/PhysRevB.99.054424.
27. Chang F. J., Lin J. G., Huang S. Y. Robust spin current generated by the spin Seebeck effect // Phys. Rev. Materials. 2017. Vol. 1, no. 3. P. 031401. DOI: 10.1103/PhysRevMaterials.1.031401.
28. Kumpor W., Kuptapol P., Wongjom C., Pongophas E., Infahsaeng Y., Maiaugree W., Phumying S., Pattanakul R., Horprathum M., Chananonwathorn C., Piyasin P., Pinitsoontorn S., Ramamoorthy H., Somphonsane R., Pijitrojana W., Ummartyotin S., Wongjom P. The spin voltage enhancement in Si/YIG/Co, Fe spin Hall thermopiles // Journal of Engineering. 2024. Vol. 2024, no. 1. P. 1140159. DOI: 10.1155/je/1140159.

29. Xiang R., Chen L., Zhang S., Li H., Du J., Du Y. W., Liu R. H. Electrical generation and detection of spin waves in polycrystalline YIG/Pt grown on silicon wafers // *Mater. Res. Express*. 2020. Vol. 7, no. 4. P. 046105. DOI: 10.1088/2053-1591/ab87d7.
30. Fukushima K., Ueda K., Moriuchi N., Kida T., Hagiwara M., Matsuno J. Spin Hall magnetoresistance in Pt/Y₃Fe₅O₁₂ bilayers grown on Si and Gd₃Ga₅O₁₂ substrates // *Appl. Phys. Lett.* 2022. Vol. 121, no. 23. P. 232403. DOI: 10.1063/5.0124583.
31. Зильберман П. Е., Темирязов А. Г., Тихомирова М. Н. Возбуждение и распространение обменных спиновых волн в пленках железо-иттриевого граната // *ЖЭТФ*. 1995. Т. 108, № 1. С. 281–302.
32. Звездин А. К., Попков А. Ф. К нелинейной теории магнитостатических спиновых волн // *ЖЭТФ*. 1983. Т. 84, № 2. С. 606–614.
33. Donahue M. J., Porter D. G. OOMMF user's guide, version 1.0. Interagency Report NIST 6376, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 1999. [Electronic resource] Available from: <http://math.nist.gov/oommf/>.
34. Dvornik M., Au Y., Kruglyak V. V. Micromagnetic simulations in magnonics // In: Demokritov S., Slavin A. (eds) *Magnonics. Topics in Applied Physics*. Berlin: Springer, 2013. P. 101–115. DOI: 10.1007/978-3-642-30247-3_8.

References

1. Chumak AV, Vasyuchka VI, Serga AA, Hillebrands B. Magnon spintronics. *Nature Phys.* 2015;11(6):453–461. DOI: 10.1038/nphys3347.
2. Rezende S. M. *Fundamentals of Magnonics*. Cham: Springer; 2020. 358 p. DOI: 10.1007/978-3-030-41317-0.
3. Wang HL, Du CH, Pu Y, Adur R, Hammel PC, Yang FY. Large spin pumping from epitaxial Y₃Fe₅O₁₂ thin films to Pt and W layers. *Phys. Rev. B*. 2013;88(10):100406(R). DOI: 10.1103/PhysRevB.88.100406.
4. Hirsch JE. Spin hall effect. *Phys. Rev. Lett.* 1999;83(9):1834–1837. DOI: 10.1103/PhysRevLett.83.1834.
5. Jungwirth T, Wunderlich J, Olejnik K. Spin Hall effect devices. *Nature Mater.* 2012;11(5):382–390. DOI: 10.1038/nmat3279.
6. Heinrich B, Burrowes C, Montoya E, Kardasz B, Girt E, Song YY, Wu M. Spin pumping at the magnetic insulator (YIG)/normal metal (Au) interfaces. *Phys. Rev. Lett.* 2011;107(6):066604. DOI: 10.1103/PhysRevLett.107.066604.
7. Harii K, An T, Kajiwara Y, Ando K, Nakayama H, Yoshino T, Saitoh E. Frequency dependence of spin pumping in Pt/Y₃Fe₅O₁₂ film. *J. Appl. Phys.* 2011;109(11):116105. DOI: 10.1063/1.3594661.
8. Balinsky M, Ranjbar M, Haidar M, Durrenfeld P, Khartsev S, Slavin A, Dumas RK. Spin pumping and the inverse spin-hall effect via magnetostatic surface spin-wave modes in Yttrium-Iron garnet/platinum bilayers. *IEEE Magnetics Letters*. 2015;6:3000604. DOI: 10.1109/LMAG.2015.2471276.
9. 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.
10. 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.* 2022;92(13):2074–2077. DOI: 10.21883/JTF.2021.10.51363.136-21.

*Селезнев М. Е., Никулин Ю. В., Дудко Г. М., Сахаров В. К., Хивинцев Ю. В., Кожеевников А. В.,
Высоцкий С. Л., Амаханов Г. М., Новицкий Н. Н., Серокурова А. И., Филимонов Ю. А.*

11. Seleznev ME. Detection of Spin Waves in Magnetic Microstructures YIG/Pt and YIG/n-InSb. PhD Thesis. Saratov: Saratov State University; 2022. 179 p. (in Russian).
12. 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.
13. 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.
14. Nikulin YuV, Vysotsky SL, Seleznev ME, Kozhevnikov AV, Sakharov VK, Dudko GM, Khivintsev YuV, Filimonov YA. Frequency dependence of the spin mixing conductance of YIG|Pt structures upon MSSW spin pumping. *Physics of the Solid State*. 2023;65(6):926–931. DOI: 10.21883/PSS.2023.06.56103.10H.
15. Nikulin YV, Khivintsev YV, Seleznev ME, Vysotskii SL, Sakharov VK, Kozhevnikov AV, Filimonov YuA. Spin pumping in YIG/Pt structures: Role of van Hove singularities. *JETP Lett*. 2024;119:688–695. DOI: 10.31857/S1234567824090076.
16. Vysotskii SL, Seleznev ME, Nirulin YuV, Kozhevnikov AV, Amahanov GM, Timiryazev AG. Detection of spin-wave excitations of a domain structure in an yttrium-iron garnet film using the inverse spin Hall effect. *Physics of the Solid State*. 2024;66(7):1023–1027. DOI: 10.61011/FTT.2024.07.58375.38HH.
17. Amakhanov GM, Seleznev ME, Nikulin YuV, Vysotskii SL, Sakharov VK, Dudko GM, Kozhevnikov AV, Khivintsev YuV, Filimonov YuA. Spin pumping by surface magnetostatic waves in microstructures based on iron-yttrium garnet films with crystallographic orientation (100). *Radiophys. Quantum Electron*. 2025;68(2):167–181. DOI: 10.52452/00213462_2025_68_02_167.
18. Vysotskii SL, Nikulin YV, Dudko GM, Kozhevnikov AV, Sakharov VK, Khivintsev YV, Nikitov SA, Filimonov YA. Effects of spin pumping in a yttrium iron garnet–platinum magnonic crystal. *Phys. Rev. Applied*. 2025;23:064035. DOI: 10.1103/lxpw-hqx2.
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. Stognij AI, Lutsev LV, Bursian VE, Novitskii NN. Growth and spin-wave properties of thin $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ films on Si substrates. *Journal of Applied Physics*. 2015;118(2):023905. DOI: 10.1063/1.4926475.
21. Lutsev LV, Stognij AI, Novitskii NN, Bursian VE, Maziewski A, Gieniusz R. Magnetic properties, spin waves and interaction between spin excitations and 2D electrons in interface layer in $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}/\text{AlO}_x/\text{GaAs}$ -heterostructures. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2018;51(35):355002. DOI: 10.1088/1361-6463/aad41b.
22. Stognij A, Lutsev L, Novitskii N, Bepalov A, Golikova O, Ketsko V, Gieniusz R, Maziewski A. Synthesis, magnetic properties and spin-wave propagation in thin $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ films sputtered on GaN-based substrates. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2015;48(48):485002. DOI: 10.1088/0022-3727/48/48/485002.
23. Sakharov VK, Khivintsev YV, Vysotskii SL, Stognij AI, Filimonov YA. Enhanced nonreciprocity of magnetostatic surface waves in yttrium-iron-garnet films deposited on silicon substrates by ion-beam evaporation. *IEEE Magnetics Letters*. 2017;8:3704105. DOI: 10.1109/LMAG.2017.2659638.
24. Sakharov VK, Khivintsev YV, Vysotskii SL, Stognij AI, Kozhevnikov AV, 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.
25. Vysotskii SL, Nikulin YV, Kozhevnikov AV, Khivintsev YuV, Sakharov VK, Dzhumaliev AS, Filimonov YuA, Stognij AI, Nikitov SA. Magnetoelastic properties of yttrium–iron garnet films manufactured by means of ion-beam sputtering onto Si and GaAs substrates. *Tech. Phys.* 2020;65:1175–1180. DOI: 10.1134/S1063784220070270.
 26. Sadovnikov AV, Beginin EN, Sheshukova SE, Sharaevskii YP, Stognij AI, Novitski NN, Sakharov VK, Khivintsev YV, Nikitov SA. Route toward semiconductor magnonics: Light-induced spin-wave nonreciprocity in a YIG/GaAs structure. *Phys. Rev. B*. 2019;99(5):054424. DOI: 10.1103/PhysRevB.99.054424.
 27. Chang FJ, Lin JG, Huang SY. Robust spin current generated by the spin Seebeck effect. *Phys. Rev. Materials*. 2017;1(3):031401. DOI: 10.1103/PhysRevMaterials.1.031401.
 28. Kumpor W, Kuptapol P, Wongjom C, Pongophas E, Infahsaeng Y, Maiaugree W, Phumying S, Pattanakul R, Horprathum M, Chananonawathorn C, Piyasin P, Pinitsoontorn S, Ramamoorthy H, Somphonsane R, Pijitrojana W, Ummartyotin S, Wongjom P. The spin voltage enhancement in Si/YIG/Co, Fe spin Hall thermopiles. *Journal of Engineering*. 2024;2024(1):1140159. DOI: 10.1155/je/1140159.
 29. Xiang R, Chen L, Zhang S, Li H, Du J, Du YW, Liu RH. Electrical generation and detection of spin waves in polycrystalline YIG/Pt grown on silicon wafers. *Mater. Res. Express*. 2020;7(4):046105. DOI: 10.1088/2053-1591/ab87d7.
 30. Fukushima K, Ueda K, Moriuchi N, Kida T, Hagiwara M, Matsuno J. Spin Hall magnetoresistance in Pt/Y₃Fe₅O₁₂ bilayers grown on Si and Gd₃Ga₅O₁₂ substrates. *Appl. Phys. Lett.* 2022;121(23):232403. DOI: 10.1063/5.0124583.
 31. Zilberman PE, Temiryazev AG, Tikhomirova MN. Excitation and propagation of exchange spin waves in films of yttrium iron garnet. *J. Exp. Theor. Phys.* 1995;81(1):151–162.
 32. Zvezdin AK, Popkov AF. Contribution to the nonlinear theory of magnetostatic spin waves. *Sov. Phys. JETP*. 1983;57(2):350–355.
 33. Donahue MJ, Porter DG. OOMMF user's guide, version 1.0. Interagency Report NIST 6376, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 1999. [Electronic resource] Available from: <http://math.nist.gov/oommf/>.
 34. Dvornik M, Au Y, Kruglyak VV. Micromagnetic simulations in magnonics. In: Demokritov S, Slavin A, editors. *Magnonics. Topics in Applied Physics*. Berlin: Springer; 2013. P. 101–115. DOI: 10.1007/978-3-642-30247-3_8.



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. Научные 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



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



Дудко Галина Михайловна — родилась в Свердловске (1961). Окончила физический факультет Саратовского университета имени 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



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



Хивинцев Юрий Владимирович — родился в 1975 году. Окончил физический факультет Саратовского государственного университета имени 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 имени 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



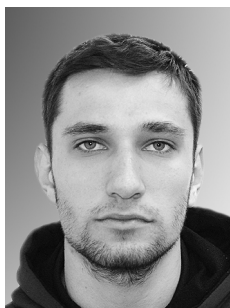
Кожевников Александр Владимирович — родился в Саратове (1962), окончил Саратовский государственный университет (1984). Работает в Саратовском филиале ИРЭ РАН старшим научным сотрудником. Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук в СГУ (2011) в области нелинейных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



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



Амаханов Гайдар Маликович — обучается в аспирантуре Саратовского государственного университета имени Н. Г. Чернышевского. Работает инженером в Саратовском филиале ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН. Область научных интересов — физика магнитных явлений, спинтроника, физика тонких плёнок.

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: agm.05@yandex.ru
ORCID: 0009-0003-9998-3384



Новицкий Николай Николаевич — родился в городе Осиповичи Могилёвской области, Республика Беларусь (1975). Окончил Белорусский государственный университет (1998). Защитил диссертацию на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук (2003). Научный сотрудник ГНПО «Научно-практический центр НАНБ по материаловедению». Область научных интересов — физика конденсированного состояния, влияние параметрической неустойчивости на распространение поверхностных магнитостатических волн в ферритовых магнитных кристаллах.

220072 Минск, ул. П. Бровки, 19
ГНПО «НПЦ НАНБ по материаловедению»
E-mail: novitski@iftt.bas-net.by



Серокурова Александра Ивановна — родилась в городе Бахмут Донецкой области (1988). Окончила Донецкий национальный технический университет (2013). Защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук в ГНПО «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению» (2021). Доцент по специальности «Физика» (2023). Старший научный сотрудник лаборатории физики магнитных пленок ГНПО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению». Имеет 38 научных публикаций.

220072 Минск, ул. П. Бровки, 19
ГНПО «НПЦ НАНБ по материаловедению»
E-mail: aleksa.serokurova@yandex.by
ORCID: 0000-0001-9825-2828
AuthorID (eLibrary.Ru): 1041038



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). Заведующий кафедрой технологии материалов на базе Саратовского филиала Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН. Научные интересы: магноника 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