

## УПРАВЛЕНИЕ СПЕКТРОМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СПИНОВЫХ ВОЛН В ГЕТЕРОСТРУКТУРЕ НА ОСНОВЕ ЛАТЕРАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ МАГНИТНЫХ МИКРОВОЛНОВОДОВ

*А. А. Грачев, А. В. Садовников*

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского  
Россия, 410012 Саратов, Астраханская, 83  
E-mail: andrew.a.grachev@gmail.com, sadovnikovav@gmail.com

*Поступила в редакцию 1.07.2017*

Проведено исследование гетероструктур, характеристиками которых можно управлять путём изменения статических магнитных и электрических полей. Тонкие плёнки железо-иттриевого граната демонстрируют существенно меньшие значения затухания спиновых волн по сравнению с металлическими магнитными плёнками, например, из пермаллоя. Длина распространения спиновых волн в магнитных микроволноводах и магнонных кристаллах составляет при комнатной температуре величину порядка единиц миллиметров. Использование латеральных магнитных микроструктур представляется важным для разработки элементов межсоединений в планарных топологиях магнонных сетей. Управление перестройкой частоты с помощью магнитного поля для устройств магноники происходит медленно и требует большого расхода энергии. В отличие от этого, электрическая настройка гораздо быстрее. В настоящей работе с помощью численного моделирования, основанного на методе конечных элементов, проведено исследование пространственной динамики гибридных электромагнитных спиновых волн в мультиферроидной гетероструктуре, образованной из параллельно ориентированных ферромагнитных микроволноводов с сегнетоэлектрическим слоем. Показана возможность гибридизации поперечных мод волн, распространяющихся в сегнетоэлектрическом слое, с симметричными и антисимметричными модами латеральной структуры, что обуславливает возможность трансформации дисперсионных характеристик мультиферроидной структуры с помощью изменения электрического поля, приложенного к слою сегнетоэлектрика. Проведено исследование влияния изменения толщины сегнетоэлектрического слоя на электродинамические характеристики волн в гетероструктуре. На основе предложенной в настоящей работе латеральной мультиферроидной структуры представляется возможным создание ответвителей и делителей мощности спин-волновых сигналов с двойным управлением.

*Ключевые слова:* Латеральные волноводы, гетероструктура, электромагнитная спиновая волна, устройства с двойным управлением.

DOI: 10.18500/0869-6632-2017-25-5-47-55

*Образец цитирования:* Грачев А.А., Садовников А.В. Управление спектром электромагнитных спиновых волн в гетероструктуре на основе латеральной системы магнитных микроволноводов // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2017. Т. 25, № 5. С. 47–55. DOI: 10.18500/0869-6632-2017-25-5-47-55

# CONTROL OF THE ELECTROMAGNETIC SPIN WAVES SPECTRUM IN A HETEROSTRUCTURE BASED ON THE LATERAL SYSTEM OF MAGNETIC MICROWAVEGUIDES

*A. A. Grachev, A. V. Sadovnikov*

Saratov State University  
83, Astrakhanskaya, 410012 Saratov, Russia  
E-mail: andrew.a.grachev@gmail.com, sadovnikovav@gmail.com

*Received 1.07.2017*

At present, the actual task is to study magnetic microstructures, the characteristics of which can be controlled by changing static magnetic and electric fields. Thin films of yttrium-iron garnet show much lower damping of spin waves in comparison with metallic magnetic films. The propagation length of spin waves in magnetic microwaveguides and magnonic crystals is of the order of a few millimeters at room temperature. The use of lateral magnetic microstructures is important for the development of interconnection elements in planar topologies of magnonic networks. The control of frequency tuning by means of a magnetic field for magnonic devices is slow and requires a large expenditure of energy. In contrast, electrical adjustment is much faster. In the present work, a numerical simulation of finite element based modeling has been performed to study the spatial dynamics of hybrid electromagnetic spin waves in a multiferroic heterostructure formed from parallel oriented ferromagnetic microwaves with a ferroelectric layer. The possibility of hybridization of the transverse modes of waves propagating in the ferroelectric layer with symmetric and antisymmetric modes of the lateral structure is shown, which makes it possible to transform the dispersion characteristics of a multiferroic structure with a change in the electric field applied to the ferroelectric layer. The effect of changing geometric parameters, such as the thickness of the ferroelectric layer, on the electrodynamic characteristics of waves in a heterostructure was studied. On the basis of the proposed lateral multiferroic structure, it is possible to create couplers and power dividers of spin-wave signals with a double control.

*Keywords:* Lateral waveguides, heterostructure, spin wave, signal processing devices, coupler.

DOI: 10.18500/0869-6632-2017-25-5-47-55

*References:* Grachev A.A., Sadovnikov A.V. Control of the electromagnetic spin waves spectrum in a heterostructure based on the lateral system of magnetic microwaveguides. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*. 2017. Vol. 25. Issue 5. P. 47–55. DOI: 10.18500/0869-6632-2017-25-5-47-55

## Введение

В настоящее время актуальной задачей является исследование магнитных микроструктур, характеристиками которых можно управлять путём изменения статических магнитных и электрических полей [1–7]. Магнитные волноведущие структуры на основе тонких плёнок железо-иттриевого граната (ЖИГ) представляют большой интерес [8, 9], так как в них возможно распространение спиновых волн, обладающих низким значением коэффициента затухания. В слоистых микроструктурах, на основе ЖИГ-микроволновода и нагруженного на него сегнетоэлектрического (СЭ) слоя, оказывается возможным управлять спектром магнитостатических спиновых волн (МСВ) с помощью изменения величины как магнитного, так и электрического полей [6, 7, 10]. Управление перестройкой частоты с помощью магнитного поля для

устройств магноники [2] происходит значительно медленнее и требует большего расхода энергии, в отличие от электрической перестройки. Используемые латеральные магнитные микроструктуры являются ключевыми элементами «магنونных сетей», которые находят широкое применение в планарных устройствах для обработки сигналов [8, 9, 11]. Использование сегнетоэлектрических слоев позволяет существенно расширить функциональность латеральных микроволноводов за счет дополнительной возможности двойного управления их характеристиками.

В настоящей работе представлены результаты исследования пространственной динамики гибридных электромагнитных спиновых волн (ЭМСВ) в системе латеральных мультиферроиков, образованных из параллельно ориентированных ферромагнитных микроволноводов с СЭ-слоем. Показана возможность гибридизации поперечных мод волн, распространяющихся в сегнетоэлектрическом слое, с симметричными и антисимметричными модами латеральной структуры, что обуславливает возможность трансформации дисперсионных характеристик мультиферроидной структуры при изменении электрического поля, приложенного к слою сегнетоэлектрика. На основе разработанной модели показана возможность эффективного управления длиной связи ЭМСВ при изменении напряженности постоянного электрического поля. Также показано, что изменение толщины СЭ-слоя приводит к изменению длины связи, что также необходимо учитывать при создании ответвителей и делителей мощности спин-волновых сигналов с двойным управлением на основе предложенной латеральной мультиферроидной структуры.

Рассматриваемая структура схематически показана на рис. 1: на подложке из галлий-гадолиниевого граната (GGG) толщиной  $500 \mu\text{m}$ , шириной  $440 \mu\text{m}$  и длиной  $6 \text{ mm}$  на расстоянии  $40 \mu\text{m}$  друг от друга расположены два ЖИГ-микроволновода толщиной  $t_{\text{YIG}} = 10 \mu\text{m}$ , шириной  $w_{\text{YIG}} = 200 \mu\text{m}$  и длиной  $5 \text{ mm}$ . На микроволноводах расположен СЭ-слой из керамического материала на основе титаната барий-стронция (BST), имеющий толщину  $t_{\text{BST}} = 200 \mu\text{m}$ , ширину  $w_{\text{BST}} = 440 \mu\text{m}$  и длину  $3 \text{ mm}$ . Диэлектрическая проницаемость СЭ-слоя  $\epsilon = 2800$ . Структура помещается в однородное статическое магнитное поле величиной  $H_0 = 1200 \text{ Oe}$  (ориентированное вдоль оси  $x$ ) для эффективного возбуждения в ЖИГ-микроволноводе поверхностной магнитостатической волны (ПМСВ), также называемой спиновой волной Дэймона-Эшбаха [12–14]. При распространении волн Дэймона-Эшбаха вдоль полосы ЖИГ происходит гибридизация их с модами электромагнитных волн СЭ-слоя. Таким образом, в области СЭ вдоль латеральных ЖИГ-микроволноводов распространяется ЭМСВ. Конечная ширина обоих магнитных микроволноводов приводит к уменьшению внутреннего магнитного поля для случая касательного намагничивания (см. рис. 1), при этом величина внутреннего магнитного поля в центре каждого микроволновода составляет  $H_i = 1148 \text{ Oe}$ .

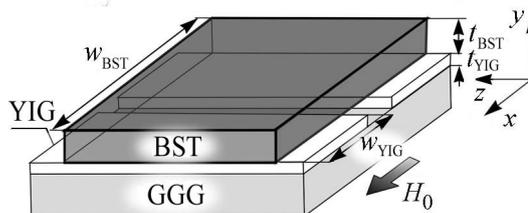


Рис. 1. Схема рассматриваемой структуры. YIG – железо-иттриевый гранат, GGG – галлий-гадолиниевый гранат, BST – сегнетоэлектрический слой

Fig. 1. Schematic view of the structure. YIG – yttrium-iron garnet, GGG – gadolinium gallium garnet, BST – ferroelectric layer

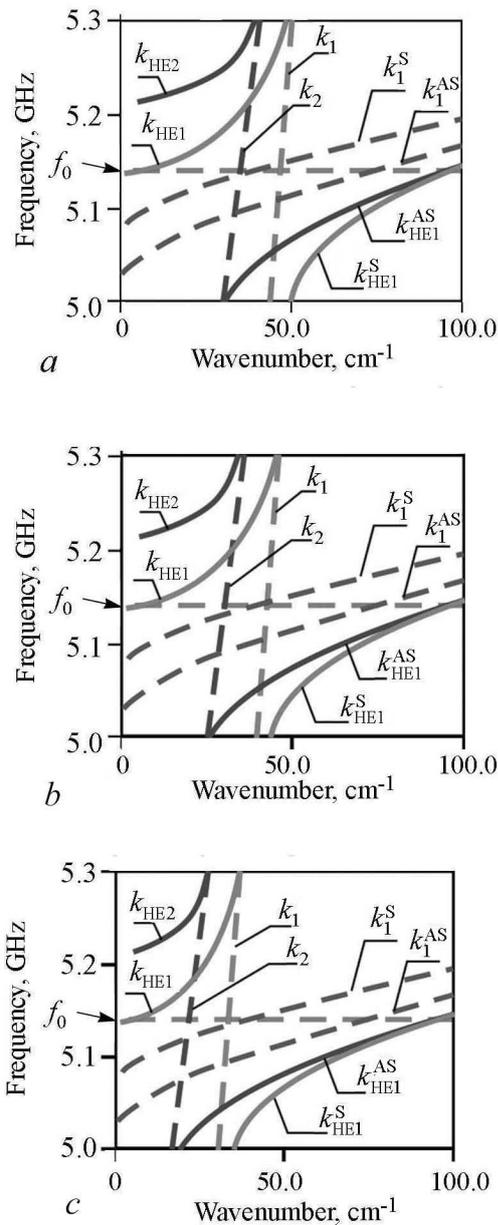


Рис. 2. Трансформация спектра ЭМСВ при изменении значения диэлектрической проницаемости и увеличении величины внешнего электрического поля: *a* –  $E = 0$  кВ/см,  $\epsilon = 2800$ ; *b* –  $E = 10$  кВ/см,  $\epsilon = 2300$ ; *c* –  $E = 20$  кВ/см,  $\epsilon = 1600$

Fig. 2. The transformation of the HSEW spectrum with change the relative permittivity and the increase of the electric field: *a* –  $E = 0$  кВ/см,  $\epsilon = 2800$ ; *b* –  $E = 10$  кВ/см,  $\epsilon = 2300$ ; *c* –  $E = 20$  кВ/см,  $\epsilon = 1600$

Для расчёта электродинамических характеристик спиновых волн в рассматриваемой структуре было произведено численное моделирование с помощью метода конечных элементов (МКЭ) [15, 16]. В микроволновом диапазоне длин волн при отсутствии приложенного напряжения эффективные значения диэлектрической проницаемости СЭ-слоя, GGG-слоя и ЖИГ-полосок полагали равными  $\epsilon = 2800$ ,  $\epsilon_{GGG} = 9$  и  $\epsilon_{YIG} = 14$ , соответственно. Тензор  $\hat{\mu}$  магнитной проницаемости ЖИГ-микроволноводов задавали в виде [14, 17]

$$\hat{\mu} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \mu(f) & -i\mu_a(f) \\ 0 & i\mu_a(f) & \mu(f) \end{pmatrix},$$

$$\mu(f) = \frac{f_H(f_H + f_M) - f^2}{f_H^2 - f^2},$$

$$\mu_a(f) = \frac{f_M f}{f_H^2 - f^2},$$

где  $f_M = \gamma 4\pi M_0 = 4.9$  GHz,  $f_H = \gamma H_0 = 3.21$  GHz,  $\gamma = 2.8$  МГц/Ое – гиромагнитное отношение в ЖИГ,  $M_0 = 139$  G – намагниченность насыщения пленки ЖИГ [14, 17].

На рис. 2 показана дисперсия ПМСВ в латеральных микроволноводах без СЭ-слоя. Спектр собственных мод двух идентичных латеральных микроволноводов состоит из симметричной и антисимметричной поперечных мод. Для симметричной моды в направлении  $x$  амплитуды магнитных потенциалов в двух плёнках ЖИГ имеют одну и ту же фазу, а для антисимметричной они находятся в противофазе [9]. Штриховые кривые показывают рассчитанную дисперсию для симметричных  $k_1^S$  и антисимметричных  $k_1^{AS}$  поперечных мод ПМСВ в латеральных микроволноводах без СЭ-слоя. В латеральной мульти-

ферроидной структуре симметричная мода  $k_1^S$  и антисимметричная мода  $k_1^{AS}$  связаны с первой  $k_1$  и второй  $k_2$  собственными модами ТЕ электромагнитной волны в СЭ-слое, соответственно.

Подчеркнем, что для описания динамики распространения ЭМСВ в латеральных мультиферроиках рассматриваются только первые поперечные моды магнитных микроволноводов [18, 19] и две низшие моды СЭ-слоя [20]. Гибридизация волн в магнитных микроволноводах и СЭ-слое приводит к пересечению дисперсионных кривых как симметричной, так и антисимметричной мод (на рис. 2 показано сплошными линиями). Поэтому в латеральной мультиферроидной структуре могут распространяться как медленные волны  $k_{HE1}$  и  $k_{HE2}$  с поперечно-электрической поляризацией в СЭ-слое, так и симметричная  $k_{HE1}^S$  и антисимметричная  $k_{HE1}^{AS}$  моды ЭМСВ.

На рис. 2 приведены расчеты дисперсионных характеристик гибридных мод ЭМСВ при увеличении электрического поля от 0 до 20 кВ/см. Видно, что происходит трансформация спектра ЭМСВ с увеличением электрического поля и, соответственно, с уменьшением величины диэлектрической проницаемости СЭ-слоя. На рисунке видно, что при увеличении электрического поля диапазон волновых чисел, в котором происходит эффективная гибридизация, смещается в длинноволновую область спектра ЭМСВ, при этом уменьшается и величина длины связи, численно равная расстоянию вдоль оси  $z$ , на котором энергия волны перекачивается из одного микроволновода в другой.

При создании устройств с двойным управлением необходимо учитывать, что изменение толщины СЭ-слоя приводит к изменению длины связи. На рис. 3 приведены дисперсионные характеристики электромагнитных волн СЭ-слоя при изменении его толщины (штриховые кри-

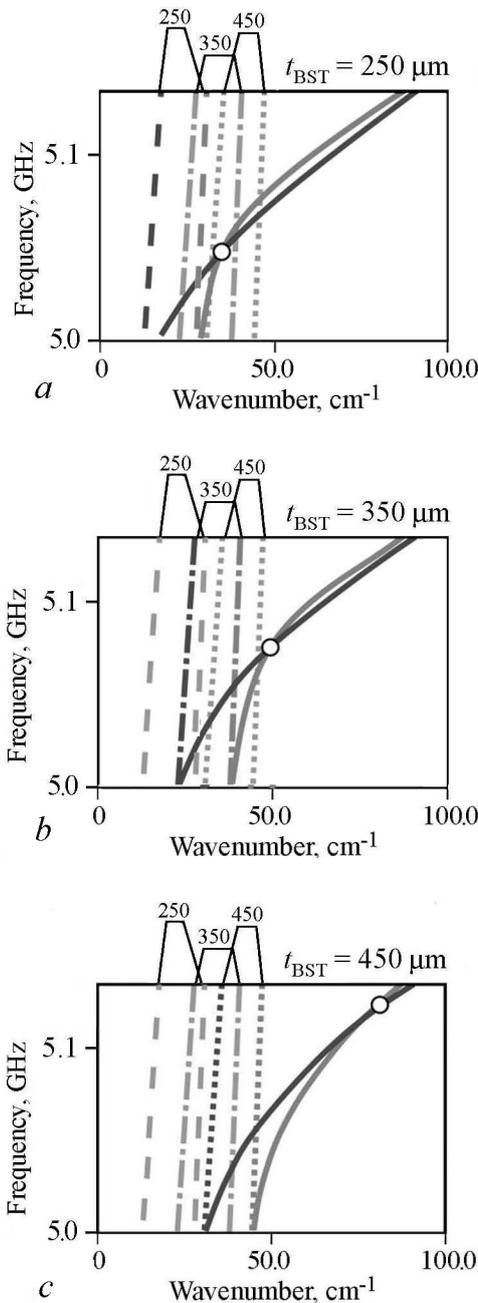


Рис. 3. Дисперсионные характеристики ТЕ мод СЭ-слоя, для различной толщины и дисперсии гибридных мод латеральной мультиферроидной структуры. Цифрами указаны толщины СЭ слоя  $t_{BST}$  в микрометрах

Fig. 3 The dispersion curves of the TE modes of the FE slab of different thicknesses and the result of hybridization modes of lateral multiferroic structure. The numbers indicate the thickness of the ferroelectric layer  $t_{BST}$  in  $\mu m$

вые для толщины 250  $\mu\text{m}$ , штрих-пунктирные кривые для – 350  $\mu\text{m}$ , пунктирные кривые для – 450  $\mu\text{m}$ ) и дисперсии симметричных и антисимметричных гибридных мод латеральной мультиферроидной структуры. Видно, что при уменьшении толщины СЭ-слоя происходит уменьшение значения волновых чисел, при которых спиновая волна эффективно гибридизируется с электромагнитной волной в СЭ. На рис. 3 показано, что точка пересечения симметричной и антисимметричной гибридной мод (обозначенная кружком) смещается в диапазон меньших волновых чисел, соответствующих области в окрестности частоты ферромагнитного резонанса в магнитной пленке. Таким образом, при  $t_{\text{BST}} = 450 \mu\text{m}$  положение точки пересечения смещается по оси волновых чисел на величину  $75 \text{ cm}^{-1}$ . В этой связи стоит подчеркнуть важность значительного превалирования толщины СЭ-слоя над толщиной магнитного микроволновода.

### Выводы

Таким образом, работе проведено исследование пространственной динамики гибридных электромагнитных спиновых волн в мультиферроидной гетероструктуре. Выявлены особенности гибридизации поперечных мод волн, распространяющихся в сегнетоэлектрическом слое, с симметричными и антисимметричными модами латеральной системы магнитных микроволноводов. Показана возможность управления характеристиками волн, распространяющихся в гетероструктуре, с помощью варьирования величиной приложенного к слою сегнетоэлектрика электрического поля. Проведены оценки влияния толщины сегнетоэлектрического слоя на дисперсионные характеристики электромагнитных спиновых волн. В частности, показано, что уменьшение толщины сегнетоэлектрического слоя приводит к смещению в длинноволновую часть спектра области эффективной гибридизации волн, распространяющихся в латеральных магнитных микроволноводах и в диэлектрической пластине.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (16-29-03120, 16-37-00217), Стипендии (СП-313.2015.5) и Гранта Президента РФ (МК-5837.2016.9).*

### Библиографический список

1. Anfimogenov V.B., Verbitskaya T.N., Zil'berman P.E., Kazakov G.T., Meriakri S.V., and Tikhonov V.V. Resonant interaction of magnetostatic backward volume waves with slow electromagnetic waves in ferrite/ferroelectric structures // Sov. Phys.–Tech. Phys. 1990. Vol. 35. 1068.
2. Nikitov S.A., Kalyabin D.V., Lisenkov I.V., Slavin A.N., Barabanenkov Y.N., Osokin S.A., Sadovnikov A.V., Beginin E.N., Morozova M.A., Sharaevsky Y.P., Filimonov Y.A., Khivintsev Y.V., Vysotsky S.L., Sakharov V.K., and Pavlov E.S. Magnonics: A new research area in spintronics and spin wave electronics // Phys. Usp. 2015. Vol. 185. 1099.
3. Fetisov Y.K., Srinivasan G. Electric field tuning characteristics of a ferrite-piezoelectric microwave resonator // Applied Physics Letters. 2006. Vol. 88. 143503.

4. *Srinivasan G., Fetisov Y.K.* Ferrite-piezoelectric layered structures: Microwave magnetoelectric effects and electric field tunable devices // *Ferroelectrics*. 2006. Vol. 342. Pp. 65–71.
5. *Sadovnikov A.V., Grachev A.A., Beginin E.N., Sheshukova S.E., Sharaevskii Yu.P., Nikitov S.A.* Voltage-controlled spin-wave coupling in adjacent ferromagnetic–ferroelectric heterostructures // *Phys. Rev. Applied*. 2017. Vol. 7. 014013.
6. *Sadovnikov A.V., Beginin E.N., Bublikov K.V., Grishin S.V., Sheshukova S.E., Sharaevskii Y.P., Nikitov S.A.* Brillouin light scattering study of transverse mode coupling in confined yttrium iron garnet/barium strontium titanate multiferroic // *J. Appl. Phys.* 2015. Vol. 118. 203906.
7. *Demidov V.E., Kalinikos B.A., Karmanenko S., Semenov A., Edenhofer P.* Electrical tuning of dispersion characteristics of surface electromagnetic-spin waves propagating in ferrite-ferroelectric layered structures // *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* 2003. Vol. 51. 2090.
8. *Chumak A.V., Vasyuchka V.I., Serga A.A., Hillebrands B.* Magnon spintronics // *Nat. Phys.* 2015. Vol. 11. 453.
9. *Sadovnikov A.V., Beginin E.N., Sheshukova S.E., Romanenko D.V., Sharaevskii Y.P., Nikitov S.A.* Directional multimode coupler for planar magnonics: Side coupled magnetic stripes // *Appl. Phys. Lett.* 2015. Vol. 107. 202405.
10. *Ustinov A.B., Srinivasan G., Kalinikos B.A.* Ferrite-ferroelectric hybrid wave phase shifters // *Appl. Phys. Lett.* 2007. Vol. 90. 031913.
11. *Khitun A., Bao M., Wang K.L.* Magnonic logic circuits // *J. Phys. D.* 2010. Vol. 43. 264005.
12. *Damon R.W., Eschbach J.* Magnetostatic modes of a ferromagnet slab // *J. Phys. Chem. Solids*. 1961. Vol. 19. 308.
13. *Bajpai S.N.* Excitation of magnetostatic surface waves: Effect of finite sample width // *J. Appl. Phys.* 1985. Vol. 58. 910.
14. *Gurevich A.G., Melkov G.A.* Magnetization Oscillations and Waves. London: CRC Press, 1996.
15. *Садовников А.В., Рожнев А.Г.* Моделирование распространения магнитостатических волн в одномерных магнетонных кристаллах // *Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика*. 2012. Т. 20, №1. С. 143–159.
16. *Silvester P.P., Ferrari R.L.* Finite Elements for Electrical Engineers. Cambridge University Press, 1996.
17. *Ваишковский А.В., Стальмахов В.С., Шараевский Ю.П.* Магнитостатические волны в электронике сверхвысоких частот. Саратов: СГУ, 1993.
18. *O'Keefe T.W., Patterson R.W.* Magnetostatic surfacewave propagation in finite samples // *J. Appl. Phys.* 1978. Vol. 49. 4886.
19. *Camley R.E.* Nonreciprocal surface waves // *Surface Science Reports*. 1987. Vol. 7. 103.
20. *Haus H.* Waves and Fields in Optoelectronics. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1984.

## References

1. Anfinogenov V.B., Verbitskaya T.N., Zil'berman P.E., Kazakov G.T., Meriakri S.V., Tikhonov V.V. Resonant interaction of magnetostatic backward volume waves with slow electromagnetic waves in ferrite/ferroelectric structures. *Sov. Phys. Tech. Phys.* 1990. Vol. 35. 1068.
2. Nikitov S.A., Kalyabin D.V., Lisenkov I.V., Slavin A.N., Barabanenkov Y.N., Osokin S.A., Sadovnikov A.V., Beginin E.N., Morozova M.A., Sharaevsky Y.P., Filimonov Y.A., Khivintsev Y.V., Vysotsky S.L., Sakharov V.K., Pavlov E.S. Magnonics: A new research area in spintronics and spin wave electronics. *Phys. Usp.* 2015. Vol. 185. 1099.
3. Fetisov Y.K., Srinivasan G. Electric field tuning characteristics of a ferrite-piezoelectric microwave resonator. *Applied Physics Letters*. 2006. Vol. 88. 143503.
4. Srinivasan G., Fetisov Y.K. Ferrite-piezoelectric layered structures: Microwave magnetoelectric effects and electric field tunable devices. *Ferroelectrics*. 2006. Vol. 342. Pp. 65–71.
5. Sadovnikov A.V., Grachev A.A., Beginin E.N., Sheshukova S.E., Sharaevskii Yu.P., Nikitov S.A. Voltage-controlled spin-wave coupling in adjacent ferromagnetic-ferroelectric heterostructures. *Phys. Rev. Applied*. 2017. Vol. 7. 014013.
6. Sadovnikov A.V., Beginin E.N., Bublikov K.V., Grishin S.V., Sheshukova S.E., Sharaevskii Y.P., Nikitov S.A. Brillouin light scattering study of transverse mode coupling in confined yttrium iron garnet/barium strontium titanate multiferroic. *J. Appl. Phys.* 2015. Vol. 118. 203906.
7. Demidov V.E., Kalinikos B.A., Karmanenko S., Semenov A., Edenhofer P. Electrical tuning of dispersion characteristics of surface electromagnetic-spin waves propagating in ferrite-ferroelectric layered structures. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* 2003. Vol. 51. 2090.
8. Chumak A.V., Vasyuchka V.I., Serga A.A., Hillebrands B. Magnon spintronics. *Nat. Phys.* 2015. Vol. 11. 453.
9. Sadovnikov A.V., Beginin E.N., Sheshukova S.E., Romanenko D.V., Sharaevskii Y.P., Nikitov S.A. Directional multimode coupler for planar magnonics: Side coupled magnetic stripes. *Appl. Phys. Lett.* 2015. Vol. 107. 202405.
10. Ustinov A.B., Srinivasan G., Kalinikos B.A. Ferrite-ferroelectric hybrid wave phase shifters. *Appl. Phys. Lett.* 2007. Vol. 90. 031913.
11. Chumak A.V., Vasyuchka V.I., Serga A.A., Hillebrands B. Magnon spintronics. *Nat. Phys.* 2015. Vol. 11. 453.
12. Damon R.W., Eschbach J. Magnetostatic modes of a ferromagnet slab. *J. Phys. Chem. Solids*. 1961. Vol. 19. 308.
13. Bajpai S.N. Excitation of magnetostatic surface waves: Effect of finite sample width. *J. Appl. Phys.* 1985. Vol. 58. 910.
14. Gurevich A.G., Melkov G.A. Magnetization Oscillations and Waves. London: CRC Press, 1996.
15. Sadovnikov A.V., Rozhnev A.G. Electrodynamical characteristics of periodic ferro-

- magnetic structures. *Izvestiya VUZ. Appl. Nonlinear Dyn.* 2012. Vol. 20. Issue 1 (in Russian).
16. Silvester P.P., Ferrari R.L. *Finite Elements for Electrical Engineers*. Cambridge University Press, 1996.
  17. Vashkovskii A.V., Stalmakhov V.S., Sharaevskii Yu.P. *Magnetostatic Waves in Microwave Electronics*. Saratov: SSU, 1993. 312 p. (in Russian).
  18. O'Keefe T.W. and Patterson R.W. Magnetostatic surfacewave propagation in finite samples. *J. Appl. Phys.* 1978. Vol. 49. 4886.
  19. Camley R.E. Nonreciprocal surface waves. *Surface Science Reports*. 1987. Vol. 7. 103.
  20. Haus H. *Waves and Fields in Optoelectronics*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1984.



*Грачев Андрей Андреевич* родился в Саратове (1994). Получил степень бакалавра (2015) по специальности «Радиофизика» и степень магистра (2017) по специальности «Прикладные математика и физика» на факультете нелинейных процессов Саратовского государственного университета. Является постоянным участником научных конференций. Работает стажёром-исследователем в Саратовском филиале ИРЭ РАН и в лаборатории «Метаматериалы» СГУ. Научные интересы: планарные структуры, метаматериалы, системы обработки и передачи информации, бриллюэновская спектроскопия, управляемые микро- и наноструктуры. Имеет 5 научных статей в реферируемых научных журналах.

410012 Саратов, Астраханская, 83  
 Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского  
 E-mail: andrew.a.grachev@gmail.com



*Садовников Александр Владимирович* родился в Саратове (1987). Окончил с серебряной медалью МОУ СОШ № 73 (Саратов) и поступил на факультет нелинейных процессов СГУ (1987), который окончил с красным дипломом. В 2009 году поступил в аспирантуру по специальностям «Радиофизика», «Оптика» и в 2012 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Работает старшим научным сотрудником в лаборатории «Метаматериалы» СГУ и доцентом на кафедре «Физика открытых систем». Научные интересы: планарные структуры, метаматериалы, системы обработки и передачи информации, бриллюэновская спектроскопия, управляемые микро- и наноструктуры. Имеет 50 научных статей в реферируемых научных журналах.

Россия, 410012 Саратов, Астраханская, 83  
 Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского  
 E-mail: sadovnikovav@gmail.com