

УДК 539.216.2:537.622.6
doi: 10.21685/2072-3040-2023-3-8

Влияние температуры отжига на параметры монокристаллических пленок ферритов-гранатов с одноосной анизотропией

А. М. Зюзин¹, М. А. Бакулин², Н. В. Янцен³

^{1,2,3}Национальный исследовательский Мордовский государственный
университет имени Н. П. Огарева, Саранск, Россия

¹zyuzin.am@rambler.ru, ²bakulinma@yandex.ru, ³nkyancen@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Монокристаллические пленки ферритов-гранатов в последнее время привлекают особое внимание в связи с наличием ряда уникальных магнитоэлектрических свойств этих материалов и с поиском новых альтернативных подходов к записи информации. Также большой интерес к этим материалам связан с перспективами их применения для логических операций на спиновых волнах в различных элементах магнитоэлектроники и спинтроники. *Целью* настоящей работы являлось исследование влияния высокотемпературного отжига на магнитные параметры пленок ферритов-гранатов. *Материалы и методы.* Образцы монокристаллических пленок ферритов-гранатов были выращены методом жидкофазной эпитаксии. Высокотемпературный отжиг проводили в муфельной печи. Определение параметров пленок производили методом ферромагнитного резонанса на радиоспектрометре, оборудованном приставкой термостатирования. *Результаты.* Исследовано влияние высокотемпературного отжига на характеристики эпитаксиальных пленок ферритов-гранатов с одноосной магнитной анизотропией. Получены зависимости намагниченности, поля анизотропии, ширины линии ферромагнитного резонанса и температуры Кюри от температуры отжига. *Выводы.* Наиболее чувствительными к высокотемпературному отжигу параметрами монокристаллических пленок ферритов-гранатов, являются ростовая магнитная анизотропия и параметры релаксации магнитной спиновой системы. Намагниченность насыщения, параметр обменного взаимодействия, а также гиромагнитное отношение при этом остаются неизменными.

Ключевые слова: пленки ферритов-гранатов, ферромагнитный резонанс, высокотемпературный отжиг, магнитная анизотропия

Для цитирования: Зюзин А. М., Бакулин М. А., Янцен Н. В. Влияние температуры отжига на параметры монокристаллических пленок ферритов-гранатов с одноосной анизотропией // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. 2023. № 3. С. 105–115. doi: 10.21685/2072-3040-2023-3-8

The effect of annealing temperature on the parameters of single-crystal garnet ferrite films with uniaxial anisotropy

A.M. Zyuzin¹, M.A. Bakulin², N.V. Yantsen³

^{1,2,3} Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia

¹zyuzin.am@rambler.ru, ²bakulinma@yandex.ru, ³nkyancen@yandex.ru

Abstract. *Background.* Monocrystalline garnet ferrite films have recently attracted special attention due to the presence of unique magnetoelectric properties number of these materials and the search for new alternative approaches to recording information. The great inter-

est in these materials is associated with their application prospects for logical operations on spin waves in various magnetoelectronics and spintronics elements. The purpose of this work is to study the high-temperature annealing effect on the garnet ferrite films magnetic parameters. *Materials and methods.* Monocrystalline garnet ferrite films samples were grown by liquid-phase epitaxy. High-temperature annealing was carried out in a muffle furnace. The films parameters were determined by the ferromagnetic resonance method on a radio spectrometer equipped with a temperature control prefix. *Results.* The high-temperature annealing effect on the characteristics of epitaxial garnet ferrite films with uniaxial magnetic anisotropy is investigated. The magnetization, anisotropy field, FMR line width and Curie temperature on the annealing temperature dependence are obtained. *Conclusions.* The most sensitive monocrystalline ferrite-garnet films parameters to high-temperature annealing are the growth magnetic anisotropy and the magnetic spin system-relaxation parameters. The saturation magnetization, the exchange interaction parameter, as well as the gyromagnetic ratio remain unchanged.

Keywords: garnet ferrite films, ferromagnetic resonance, high-temperature annealing, magnetic anisotropy

For citation: Zyuzin A.M., Bakulin M.A., Yantsen N.V. The effect of annealing temperature on the parameters of single-crystal garnet ferrite films with uniaxial anisotropy. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Fiziko-matematicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Physical and mathematical sciences.* 2023;(3):105–115. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3040-2023-3-8

Введение

Исследованиям монокристаллических пленок ферритов-гранатов посвящено большое количество работ [1–3], ранее это было связано с их применением в запоминающих устройствах на цилиндрических магнитных доменах, датчиках магнитного поля и различных магнитооптических устройствах. В последнее время они привлекают особое внимание, связанное с наличием ряда уникальных магнитоэлектрических свойств этих материалов [4, 5], с поиском новых альтернативных подходов к записи информации, один из которых продемонстрирован в области сверхбыстрого оптомагнетизма, заключающегося в записи информации короткими оптическими импульсами без приложения внешнего магнитного поля [6, 7]. Также большой интерес к этим материалам связан с перспективами их применения для логических операций на спиновых волнах в тонкопленочных волноводах [8–10], магнонных транзисторах и других элементах магнитоэлектроники и спинтроники [11–13]. Поэтому исследование влияния различных физических факторов на параметры пленок ферритов-гранатов представляет научный и практический интерес.

В настоящей работе исследовано влияние высокотемпературного отжига в воздушной среде на магнитную анизотропию и другие параметры монокристаллических эпитаксиальных пленок ферритов-гранатов, а также на температурные зависимости этих параметров.

Материалы и методы

Пленки ферритов-гранатов состава $(Y_{1,4}Sm_{0,47}Lu_{0,38}Ca_{0,75})(Ge_{0,65}Si_{0,1}Fe_{4,25})O_{12}$ были выращены методом жидкофазной эпитаксии на подложках из гадолиний-галлиевого граната с кристаллографической плоскостью (111). Состав пленок задавали содержанием окислов в растворе в расплаве и опре-

деляли методом рентгеновского энергодисперсионного микроанализа на многофункциональном растровом электронном микроскопе Quanta 200 i 3D FEI с кремниевым дрейфовым детектором Apollo X. Толщина пленок была равной 2,1 мкм, намагниченность насыщения $4\pi M = 470$ Гс, эффективное поле одноосной анизотропии $H_{ku}^{eff} = H_{ku} - 4\pi M = 1370$ Э (здесь H_{ku} – поле одноосной ростовой анизотропии), поле кубической анизотропии $H_{k1} = 96$ Э.

Для проведения высокотемпературного отжига образцы пленок ферритов-гранатов, предварительно тщательно очищенные, помещали в печь. Помещение и извлечение из печи производилось в течение 2 мин. Время отжига при каждой температуре составляло 60 мин. Температура поддерживалась с точностью ± 3 °С.

Определение параметров пленок производили методом ферромагнитного резонанса на радиоспектрометре PS 100X на частоте 9,4 ГГц. Постоянное магнитное поле изменялось в диапазоне 0–6000 Э. Для регистрации температурных зависимостей параметров пленок использовалась система термостатирования tSTAT335b. Точность поддержания температуры составляла ± 1 °С.

Намагниченность насыщения $4\pi M_S$ определяли по интенсивности и ширине линии поглощения [14]:

$$M_S = \frac{I' \Delta H_{pp}^2 V_0}{I'_0 \Delta H_{pp0}^2 V} M_{S0}, \quad (1)$$

где I' – амплитуда производной линии поглощения; ΔH_{pp} – расстояние по шкале полей между пиками производной; V – объем образца. Параметры с индексом «0» соответствуют эталонному образцу. Эталонный и исследуемый образцы имели форму дисков диаметром 3 мм. Определение полей одноосной и кубической анизотропии проводили по резонансным полям при перпендикулярной и параллельной ориентациях постоянного магнитного поля $\vec{H}$ относительно плоскости пленки с использованием данных по угловым зависимостям резонансного поля.

Регистрацию таких зависимостей производили с помощью специального держателя, позволяющего вращать пленку относительно двух ортогональных осей в резонаторе. Его применение позволяет производить необходимые угловые измерения, в том числе и такие, когда внешнее поле $\vec{H}$ описывает коническую поверхность с осью, совпадающей с нормалью к пленке, т.е. регистрировать азимутальные зависимости $H_p(\varphi_H)$ при заданном значении полярного угла θ_H между $\vec{H}$ и нормалью к плоскости пленки. Такая процедура использовалась для нахождения плоскостей (110), перпендикулярных плоскости пленки (111) и определения поля кубической анизотропии H_{k1} [15]. Определение эффективного поля одноосной анизотропии $H_{ku}^{eff} = H_{ku} - 4\pi M_S$, поля кубической анизотропии H_{k1} и гиромангнитного отношения γ производилось следующим образом. Сначала по резонансным

полям при перпендикулярной $H_{\perp}$ и параллельной $H_{\parallel}$ ориентациях $\vec{H}$ относительно плоскости пленки с помощью выражений

$$\frac{\omega}{\gamma} = H_{\perp} + H_{ku}^{eff} - \frac{2}{3}H_{k1}, \quad (2)$$

$$\left(\frac{\omega}{\gamma}\right)^2 = H_{\parallel} \left(H_{\parallel} - H_{ku}^{eff} - \frac{1}{2}H_{k1} \right) \quad (3)$$

определяли γ и H_{ku}^{eff} , приняв значение H_{k1} равным нулю. Значения H_{ku}^{eff} и γ использовались для нахождения с помощью условия равновесной ориентации намагниченности [16]:

$$H_{ku}^{eff} \sin(2\theta_M) = 2H \sin(\theta_H - \theta_M), \quad (4)$$

полярного угла θ_H , соответствующего заданному значению угла θ_M между нормалью к пленке и вектором намагниченности $\vec{M}$.

Поле кубической анизотропии H_{k1} определяли из азимутальной зависимости резонансного поля $H_p(\phi_H)$ при значении θ_H , соответствующем $\theta_M = 60^\circ$. При этом ϕ_H отсчитывалось в плоскости пленки. В работе [15] показано, что при регистрации азимутальной зависимости $H_p(\phi_H)$, когда $\vec{H}$ лежит в плоскости пленки с ориентацией (111), влияние кубической анизотропии на изменение значения $H_p(\phi_H)$ пренебрежимо мало и составляет примерно $0,012H_{k1}$. В максимальной же степени действие кубической анизотропии проявляется при регистрации $H_p(\phi_H)$ в геометрии, когда угол θ_M между нормалью к пленке и вектором намагниченности $\vec{M}$ равен или близок к 60° . В этом случае при изменении угла ϕ_H вектор $\vec{M}$ попеременно проходит вблизи направлений [100] и [111] с периодом $\phi_H = 120^\circ$, величина вариации резонансного поля $\Delta H_p(\phi_H)$ при этом составляет примерно $1,5H_{k1}$.

Результаты

Зависимости эффективного поля одноосной анизотропии H_{ku}^{eff} , ширины линии $2\Delta H$, намагниченности насыщения $4\pi M_S$ и гиромагнитного отношения γ исследованных пленок от температуры отжига T_{ann} представлены на рис. 1.

Также были исследованы температурные зависимости эффективного поля одноосной анизотропии, гиромагнитного отношения, намагниченности и параметра затухания, определена температура Кюри в пленках до и после отжига (рис. 2 и 3). В пределах погрешности измерений, которая в значитель-

ной степени зависит от ширины линии ферромагнитного резонанса (ФМР), значение поля кубической анизотропии не изменялось.

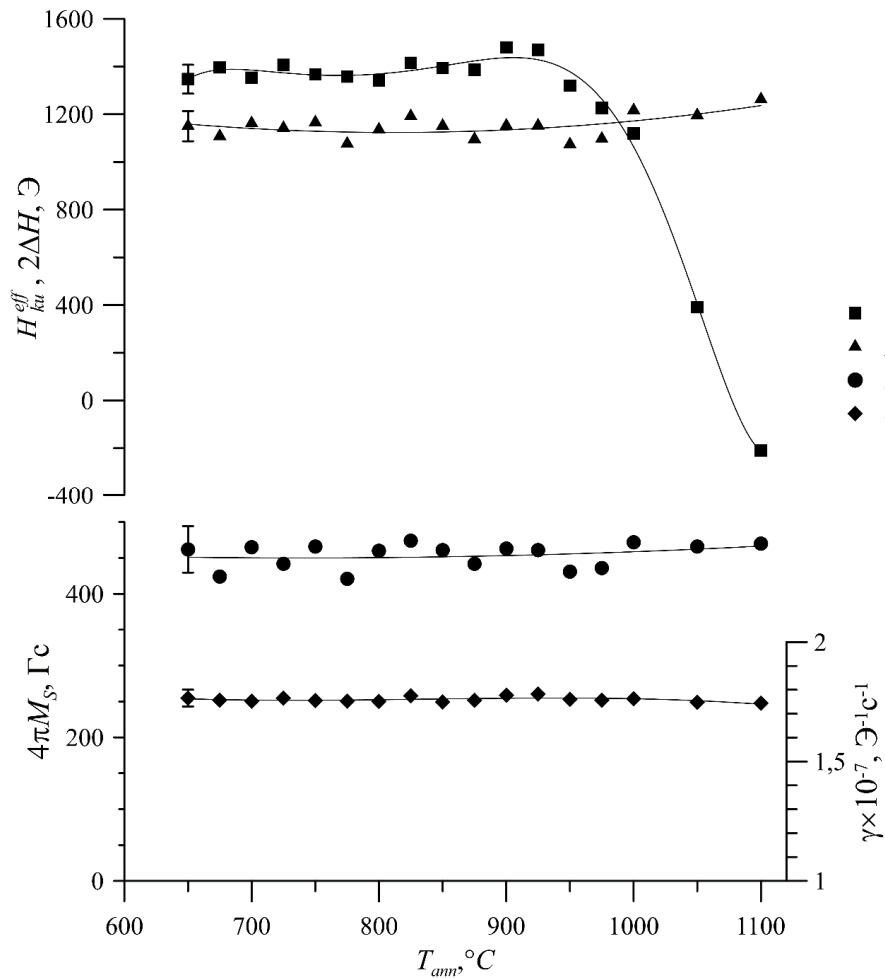


Рис. 1. Зависимости H_{ku}^{eff} (1), $2\Delta H$ (2), $4\pi M_s$ (3) и γ (4) от температуры отжига T_{ann}

Обсуждение

Видно, что вплоть до температур $\sim 900^\circ\text{C}$ каких-либо заметных изменений величин этих параметров не наблюдается. При дальнейшем увеличении T_{ann} начинает резко уменьшаться H_{ku}^{eff} и в результате отжига при температуре 1100°C его значение становится отрицательным. Отрицательное значение обусловлено вкладом размагничивающего поля ($-4\pi M$). Намагниченность насыщения, гиромагнитное отношение и ширина линии при этом остаются неизменными. Неизменность намагниченности свидетельствует о том, что какого-либо изменения в распределении ионов железа по тетраэдрическим и октаэдрическим позициям в результате отжига не происходит. При

этом несколько изменяется характер взаимодействия между быстро релаксирующими (редкоземельными) ионами додекаэдрической подрешетки и ионами Fe^{3+} , о чем свидетельствует небольшое возрастание $2\Delta H$.

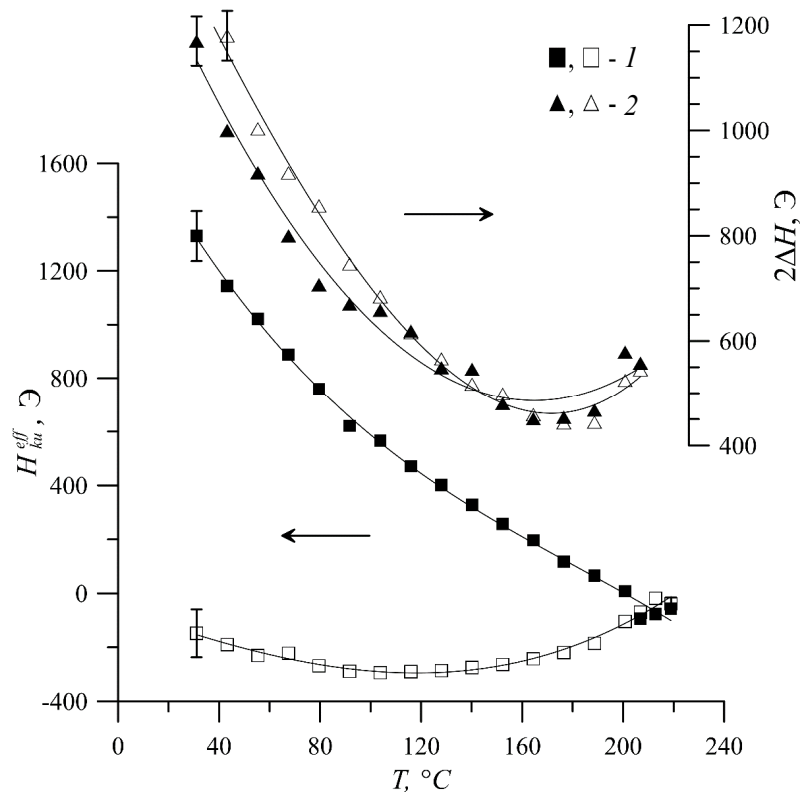


Рис. 2. Температурные зависимости эффективного поля одноосной анизотропии (1) и ширины линии ФМР (2) для исходного (темные символы) и отожженного (светлые символы) образцов

Из рис. 2 и 3 видно, что изменения, произошедшие в структуре пленки в результате высокотемпературного отжига, весьма существенным образом изменили значение поля одноосной анизотропии и, соответственно, его температурную зависимость и практически не повлияли на намагниченность насыщения, гиромагнитное отношение и температуру Кюри, которая связана с энергией обменного взаимодействия [17]:

$$A = A_0 \frac{T_K - T}{T_{K0} - T}, \quad (5)$$

где A_0 и T_{K0} – значения константы обменного взаимодействия и температуры Кюри феррита-граната, в структуре тетра- и октаэдрических подрешеток которого отсутствуют ионы замещения; T_K – температура Кюри исследуемого феррита-граната.

Согласно известной модели [2] ростовая одноосная магнитная анизотропия обусловлена селективным заселением кристаллографически неэквивалентных позиций.

валентных додекаэдрических позиций редкоземельными ионами с большим и малым ионными радиусами. Поэтому резкое уменьшение H_{ku}^{eff} при температурах выше 900 °С можно объяснить процессами перераспределения таких ионов по додекаэдрическим позициям. Такое перераспределение приводит и к некоторому возрастанию времени релаксации магнитной спиновой системы пленок, о чем свидетельствует увеличение ширины линии ФМР при температурах выше 1000 °С. Как известно [1, 2], время релаксации магнитной спиновой системы феррита-граната в существенной степени определяется содержанием быстро релаксирующих ионов и их состоянием. В исследованных пленках такими ионами являются редкоземельные ионы Sm^{3+} , обладающие большим ионным радиусом.

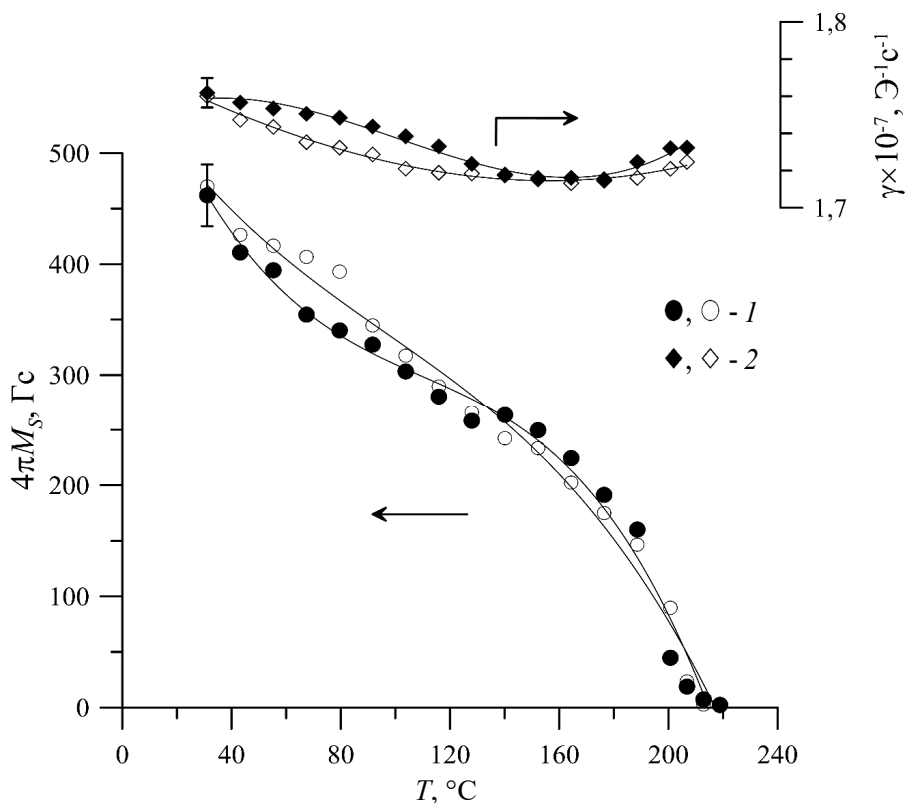


Рис. 3. Температурные зависимости намагниченности насыщения (1) и гиромагнитного отношения (2) для исходного (темные символы) и отожженного (светлые символы) образцов

Неизменившееся значение температуры Кюри, а следовательно, и энергия обменного взаимодействия, а также схожесть температурных зависимостей ширины линии, гиромагнитного отношения и намагниченности исходного и отожженного образцов, свидетельствуют о том, что величина косвенного обменного взаимодействия между ионами Fe^{3+} в тетра- и октаэдрических подрешетках, как и состояние кислородного окружения этих ионов,

в результате отжига не изменились. Наблюдаемую немонотонность на температурной зависимости эффективного поля одноосной анизотропии H_{ki}^{eff} для отожженного образца (рис. 2) и наличие минимума при температуре $\sim 120^\circ\text{C}$ можно объяснить различием в характере температурных зависимостей ростовой компоненты поля одноосной анизотропии $H_{ki}(T)$ и размагничивающего поля $4\pi M_S(T)$.

Заключение

Таким образом, на основании результатов, полученных в настоящей работе, можно сделать следующие выводы:

1. Установлено, что изменения в структуре монокристаллических пленок ферритов-гранатов, происходящие в результате высокотемпературного отжига на воздухе вплоть до температур 1100°C , не влияют на величину намагниченности, гиромагнитное отношение и константу обменного взаимодействия.

2. Параметром пленок, наиболее чувствительным к высокотемпературному отжигу, является ростовая магнитная анизотропия. Резкое уменьшение эффективного поля одноосной анизотропии при температурах выше 900°C можно объяснить протекающими процессами более статистически равномерного перераспределения ионов с малыми и большими ионными радиусами по додекаэдрическим позициям в структуре феррита-граната.

Список литературы

1. Балбашов А. М., Червоненкис А. Я. Магнитные материалы для микроэлектроники. М.: Энергия, 1979. 215 с.
2. Эшенфельдер А. Физика и техника цилиндрических магнитных доменов. М.: Мир, 1983. 496 с.
3. Волков В. В., Боков В. А. Динамика доменной стенки в ферромагнетиках (Обзор) // Физика твердого тела. 2008. Т. 50, № 2. С. 193–221.
4. Куликова Д. П., Пятаков А. П., Николаева Е. П., Сергеев А. С., Косых Т. Б., Пятакова З. А., Николаев А. В., Звездин А. К. Зарождение цилиндрических магнитных доменов в пленках ферритов гранатов с помощью электрического зонда // Письма в журнал экспериментальной и теоретической физики. 2016. Т. 104, № 3. С. 196–200. doi: 10.7868/S0370274X1615011X
5. Logginov A. S., Meshkov G. A., Nikolaev A. V., Nikolaeva E. P., Pyatakov A. P. Room temperature magnetoelectric control of micromagnetic structure in iron garnet films // Applied Physics Letter. 2008. Vol. 93, iss. 18. P. 182510. doi: 10.1063/1.3013569
6. Sadovnikov A. V., Davies C. S., Kruglyak V. V., Romanenko D. V., Grishin S. V., Beginin E. N., Sharaevskii Y. P., Nikitov S. A. Spin wave propagation in a uniformly biased curved magnonic waveguide // Physical Review B. 2017. Vol. 96. P. 060401(R). doi: 10.1103/PhysRevB.96.060401
7. Овчаренко С. В., Гапонов М. С., Ильин Н. А., Логунов М. В., Wu A., Мишина Е. Д. Лазерно-индуцированная спиновая динамика в пленке железо-иттриевого граната, легированного ионами Si // Российский технологический журнал. 2020. Т. 8, № 1. С. 58–66. doi: 10.32362/2500-316X-2020-8-1-58-66
8. Goto T., Morimoto R., Pritchard J. W., Mina M., Tagagi H., Nakamura Y., Lim P. B., Taira T., Inoue M. Magneto-optical Q-switching using magnetic garnet film with mi-

- cromagnetic domains // Optics Express. 2016. Vol. 24, iss. 16. P. 17635–17643. doi: 10.1364/OE.24.017635
9. Klingler S., Chumak A. V., Mewes T., Khodadadi B., Mewes C., Dubs C., Surzhenko O., Hillebrands B., Conca A. Measurements of the exchange stiffness of YIG films using broadband ferromagnetic resonance techniques // Journal of Physics D: Applied Physics. 2015. Vol. 48, iss. 1. P. 015001. doi: 10.1088/0022-3727/48/1/015001
 10. Khitun A., Bao M., Wang K. L. Spin Wave Magnetic NanoFabric: A New Approach to Spin-Based Logic Circuitry // IEEE Transactions on Magnetics. 2008. Vol. 44, iss. 9. P. 2141–2152. doi: 10.1109/TMAG.2008.2000812
 11. Shneider T., Serga A. A., Leven B., Hillebrands B. Realization of spin-wave logic gates // Applied Physics Letters. 2008. Vol. 92, iss. 2. P. 022505. doi: 10.1063/1.2834714
 12. 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, iss. 7286. P. 262–266. doi: 10.1038/nature08876
 13. 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 Mater. 2010. Vol. 9, iss. 11. P. 894–897. doi: 10.1038/nmat2856
 14. Зюзин А. М., Ваньков В. Н., Радайки В. В. Определение намагниченности насыщения анизотропных магнитных пленок по интенсивности и ширине линии ФМР // Письма в журнал технической физики. 1991. Т. 17, № 23. С. 65–69.
 15. Гуревич А. Г., Мелков Г. А. Магнитные колебания и волны. М. : Физматлит, 1994. 464 с.
 16. Зюзин А. М., Радайки В. В., Бажанов А. Г. К вопросу об определении поля магнитной кубической анизотропии в (111) ориентированных пленках методом ФМР // Журнал технической физики. 1997. Т. 67, № 2, С. 35–40.
 17. Slonczewski J. C., Malozemov A. P., Giess E. A. Temperature dependence of exchange stiffness in garnet bubble films // Applied Physics Letters. 1974. Vol. 24, iss. 8. P. 396–397. doi: 10.1063/1.1655232

References

1. Balbashov A.M., Chervonenkis A.Ya. *Magnitnye materialy dlya mikroelektroniki = Magnetic materials for microelectronics*. Moscow: Energiya, 1979:215. (In Russ.)
2. Eshenfel'der A. *Fizika i tekhnika tsilindricheskikh magnitnykh domenov = Physics and technology of cylindrical magnetic domains*. Moscow: Mir, 1983:496. (In Russ.)
3. Volkov V.V., Bokov V.A. Domain wall dynamics in ferromagnets (Review). *Fizika tverdogo tela = Solid state physics*. 2008;50(2):193–221. (In Russ.)
4. Kulikova D.P., Pyatakov A.P., Nikolaeva E.P., Sergeev A.S., Kosykh T.B., Pyatukova Z.A., Nikolaev A.V., Zvezdin A.K. Generation of cylindrical magnetic domains in garnet ferrite films using an electric probe. *Pis'ma v zhurnal eksperimental'noy i teoreticheskoy fiziki = Letters to the Journal of Experimental and Theoretical Physics*. 2016;104(3):196–200. (In Russ.). doi: 10.7868/S0370274X1615011X
5. Logginov A.S., Meshkov G.A., Nikolaev A.V., Nikolaeva E.P., Pyatakov A.P. Room temperature magnetoelectric control of micromagnetic structure in iron garnet films. *Applied Physics Letter*. 2008;93(18):182510. doi: 10.1063/1.3013569
6. Sadovnikov A.V., Davies C.S., Kruglyak V.V., Romanenko D.V., Grishin S.V., Beginin E.N., Sharaevskii Y.P., Nikitov S.A. Spin wave propagation in a uniformly biased curved magnonic waveguide. *Physical Review B*. 2017;96:060401(R). doi: 10.1103/PhysRevB.96.060401
7. Ovcharenko S.V., Gaponov M.S., Il'in N.A., Logunov M.V., Wu A., Mishina E.D. Laser-induced spin dynamics in a film of yttrium iron garnet doped with Si ions. *Rossiyskiy tekhnologicheskii zhurnal = Russian technological journal*. 2020;8(1):58–66. (In Russ.). doi: 10.32362/2500-316X-2020-8-1-58-66

8. Goto T., Morimoto R., Pritchard J.W., Mina M., Tagagi H., Nakamura Y., Lim P.B., Taira T., Inoue M. Magneto-optical Q-switching using magnetic garnet film with micromagnetic domains. *Optics Express*. 2016;24(16):17635–17643. doi: 10.1364/OE.24.017635
9. Klingler S., Chumak A.V., Mewes T., Khodadadi B., Mewes C., Dubs C., Surzhenko O., Hillebrands B., Conca A. Measurements of the exchange stiffness of YIG films using broadband ferromagnetic resonance techniques. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2015;48(1):015001. doi: 10.1088/0022-3727/48/1/015001
10. Khitun A., Bao M., Wang K.L. Spin Wave Magnetic NanoFabric: A New Approach to Spin-Based Logic Circuitry. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2008;44(9):2141–2152. doi: 10.1109/TMAG.2008.2000812
11. Shneider T., Serga A.A., Leven B., Hillebrands B. Realization of spin-wave logic gates. *Applied Physics Letters*. 2008;92(2):022505. doi: 10.1063/1.2834714
12. 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
13. 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 Mater*. 2010;9(11):894–897. doi: 10.1038/nmat2856
14. Zyuzin A.M., Van'kov V.N., Radaykin V.V. Determination of the saturation magnetization of anisotropic magnetic films from the intensity and width of the FMR line. *Pis'ma v zhurnal tekhnicheskoy fiziki = Letters to the journal of technical physics*. 1991;17(23):65–69. (In Russ.)
15. Gurevich A.G., Melkov G.A. *Magnitnye kolebaniya i volny = Magnetic vibrations and waves*. Moscow: Fizmatlit, 1994:464. (In Russ.)
16. Zyuzin A.M., Radaykin V.V., Bazhanov A.G. On the question of determining the field of magnetic cubic anisotropy in (111) oriented films by the FMR method. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki = Journal of technical physics*. 1997;67(2):35–40. (In Russ.)
17. Slonczewski J.C., Malozemov A.P., Giess E.A. Temperature dependence of exchange stiffness in garnet bubble films. *Applied Physics Letters*. 1974;24(8):396–397. (In Russ.). doi: 10.1063/1.1655232

Информация об авторах / Information about the authors

Александр Михайлович Зюзин

доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой экспериментальной и теоретической физики, Национальный исследовательский Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева (Россия, г. Саранск ул. Большевикская, 68а)

E-mail: Zyuzin.am@rambler.ru

Aleksandr M. Zyuzin

Doctor of physical and mathematical sciences, professor, head of the sub-department of experimental and theoretical physics, Ogarev Mordovia State University (68a Bolshevistskaya street, Saransk, Russia)

Максим Анатольевич Бакулин

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры экспериментальной и теоретической физики, Национальный исследовательский Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева (Россия, г. Саранск ул. Большевикская, 68а)

E-mail: bakulinma@yandex.ru

Maksim A. Bakulin

Candidate of physical and mathematical sciences, associate professor of the sub-department of experimental and theoretical physics, Ogarev Mordovia State University (68a Bolshevistskaya street, Saransk, Russia)

Никита Владимирович Янцен

кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры экспериментальной
и теоретической физики, Национальный
исследовательский Мордовский
государственный университет
имени Н. П. Огарева (Россия, г. Саранск
ул. Большевикская, 68а)

E-mail: nkyancen@yandex.ru

Nikita V. Yantsen

Candidate of physical and mathematical
sciences, associate professor
of the sub-department of experimental
and theoretical physics, Ogarev Mordovia
State University (68a Bolshevikskaya
street, Saransk, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 11.05.2023

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 28.06.2023

Принята к публикации / Accepted 14.08.2023