

Оригинальная статья / Original article

УДК 537.523.2

<https://doi.org/10.21869/2223-1528-2025-15-3-173-180>



Частотно-размерные магнитоупругие эффекты в магнетике с учетом смещений ДГ

Л.П. Петрова¹, Н.М. Игнатенко^{1✉}, А.А. Солдатов¹

¹ Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: inmkstu@bk.ru

Резюме

Цель. Расчетным путем выявить закономерности, связанные с частотно-размерными магнитоупругими эффектами в магнетике с учетом смещений ДГ. Выполнить описание частотно-размерных эффектов, обусловленных геометрическими параметрами доменных границ относительно длины волны напряжений. Поскольку доменные границы обладают определенной инертностью, то это приводит к некоторым особенностям при их смещении под действием силовых полей.

Методы. В работе изложен алгоритм расчета составляющих потерь, основанный на макроскопическом подходе, и выяснена причина их уменьшения при критических частотах в случае малых напряжений σ . Рассмотрение ведется на основе модели гибкой доменной границы. Предложенные методы аналитического описания диссипации магнитоупругой энергии и машинного моделирования соответствующих процессов будут полезны и для научных, и для практических целей, например, при создании специальных электро- и радиотехнических ферромагнитных материалов.

Результаты. Анализ показал, что магнитоупругие потери, возникающие при упругих колебаниях на критических частотах в магнетике, достигают минимума при условии, что волновой фронт не будет совпадать с плоскостью доменной границы в ее первоначальном положении. Это справедливо для доменных границ, закрепленных точечными или линейными дефектами.

Заключение. Приближение собственных частот колебаний ДГ к критическим значениям приводит к резкому росту резонансной составляющей внутреннего трения. Результирующее же её значение под влиянием этой составляющей изменяется незначительно. Выявленные в работе особенности диссипации магнитоупругой энергии представляют интерес в лабораторных исследованиях и перспективны для практики при определении ориентировки кристаллов и описании текстуры, а также при создании новых перспективных магнитных материалов.

Ключевые слова: магнетики; упругие волны; доменные границы; вектор спонтанной намагниченности; внутреннее трение; коэффициент поглощения; механострикция.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Петрова Л.П., Игнатенко Н.М., Солдатов А.А. Частотно-размерные магнитоупругие эффекты в магнетике с учетом смещений ДГ // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2025. Т. 15. № 3. С. 173–180. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2025-15-3-173-180>.

Поступила в редакцию 20.08.2025

Подписана в печать 03.09.2025

Опубликована 30.09.2025

Frequency-dimensional magnetoelastic effects in a magnet taking into account the DG offsets

Lyudmila P. Petrova¹, Nikolay M. Ignatenko¹✉, Andrey A. Soldatov¹

¹ Southwest State University
50 Let Oktyabrya Str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: inmkstu@bk.ru

Abstract

Purpose. It is calculated to identify patterns related to frequency-dimensional magnetoelastic effects in a magnet, taking into account DG displacements. To describe the frequency-dimensional effects caused by the geometric parameters of the domain boundaries relative to the voltage wavelength. Since domain boundaries have a certain inertia, this leads to some peculiarities when they shift under the influence of force fields.

Methods. The paper describes an algorithm for calculating the loss components based on a macroscopic approach, and elucidates the reason for their decrease at critical frequencies in the case of low voltages σ . The review is based on the flexible domain boundary model. The proposed methods for the analytical description of magnetically elastic energy dissipation and machine modeling of the corresponding processes will be useful for both scientific and practical purposes, for example, when creating special electro- and radio-technical ferromagnetic materials.

Results. The analysis showed that magnetically elastic losses arising from elastic vibrations at critical frequencies in a magnet reach a minimum, provided that the wavefront does not coincide with the plane of the domain boundary in its initial position. This is true for domain boundaries fixed by point or linear defects.

Conclusion. The approximation of the natural oscillation frequencies of the DG to critical values leads to a sharp increase in the resonant component of internal friction. The resulting value, under the influence of this component, changes slightly. The revealed features of magnetically elastic energy dissipation are of interest in laboratory research and are promising for practice in determining crystal orientation and texture description, as well as in creating new promising magnetic materials.

Keywords: magnetics; elastic waves; domain boundaries; spontaneous magnetization vector; internal friction; absorption coefficient; mechanostriction.

Conflict of interest: The Authors declare no apparent or potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Petrova L.P., Ignatenko N.M., Soldatov A.A. Frequency-dimensional magnetoelastic effects in a magnet taking into account the DG offsets. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies.* 2025;15(3):173–180. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2025-15-3-173-180>.

Received 20.08.2025

Accepted 03.09.2025

Published 30.09.2025

Введение

Работа М. Киттеля [1] является одной из первых теоретических работ по теории магнитных доменов и их поведению в магнитных полях. В исследовании В.В. Волкова и В.А. Бокова [2] рассмотрена динамика доменной стенки, а в работе Б.В. Петухова [3] рассчитывается скорость движения ДГ в квазидоменной наносистеме, в [4] исследуется динамика ДГ в ультратонких магнитных материалах, в работе В.Г. Барьяхтара и др. [5], также приве-

дены исследования динамики ДГ, но уже в слабых ферромагнетиках, работа О.Ю. Комина и др. [6] посвящена экспериментальному исследованию скорости ДГ в магнитных полях, а в [7] приводятся исследования магнитомеханических свойств эластичных магнитных композитов. В работе В.Г. Шаврова и В.И. Щеглова [8] исследуется динамика намагниченности магнетика при изменении ориентации равновесного состояния вектора намагниченности, а в монографии В.Г. Шаврова и др.

[9] приведены исследования взаимодействия спиновых, упругих и электромагнитных волн в магнитных материалах с разными типами магнитного упорядочения. В [10] для описания движения доменной стенки GdFeCo используется метод двукратной высокоскоростной фотографии. В работе [11] рассмотрены особенности магнитоупругой СВЧ динамики трехслойной структуры, в [12] – магнитоупругие аномалии в динамике доменных границ.

Как оказалось, закономерности, связанные с частотно-размерными магнитоупругими эффектами в магнетике с учетом смещений ДГ, в открытых источниках не были раскрыты.

Рассмотрим особенности обратимых смещений ДГ, связанные с геометрией последних, с учетом исследований, приведенных в [13] и [14], и спецификой воздействий на них упругих волн.

В работе [14] рассматривались эффекты, связанные с осцилляцией ДГ под действием упругих воздействий (при критических частотах). Исследования показали, что когда волновой фронт не совпадает с начальным положением плоскости ДГ, потери, не зависящие от амплитуды, минимальны¹. Однако, если частоты колебаний ДГ приближаются к критическим, внутреннее трение Q^{-1} резко возрастает. При этом эффективное значение Q^{-1} (обусловленное первой составляющей) практически не меняется [15].

Обозначим задачи:

– из адекватной опыта модели гибкой ДГ в случае линейного отклика найти особенности изменения величин $Q^{-1}(\omega)$, $\alpha(\omega)$ и $\Delta(E^{-1})$;

– предложить алгоритм расчёта составляющей $Q^{-1}(\omega)$, $\alpha(\omega)$, обнаруживающей максимум в интервале частот вблизи ω_k и резонансных.

Рассмотрим идеологию нахождения двух составляющих магнитоупругих потерь в магнетике, влияние на них геометрии ДГ, а также направления волнового вектора упругой волны к плоскости ДГ.

Материалы и методы

Рассмотрение будем вести с использованием модели гибкой границы. Для этого случая нечетные гармоники при описании осцилляций ДГ зануляются, а четные нет. Четные гармоники и дают среднюю нулевую механострикцию и значение $\alpha = 0$ и $Q^{-1} = 0$. Возникновение резонансных колебаний ДГ может привести к значительным потерям в области высоких частот (за счет потерь энергии ДГ на процессы излучения).

Для 90° ДГ в плоскости (110), задав граничные условия для её уравнения:

$$\ddot{u} + \frac{\beta_c}{m_e} \dot{u} - \frac{\gamma}{m_e} (u''_{x'x'} + u''_{z'z'}) + \frac{k'}{m_e} u = g(x', z, t) = F \sin\left(\omega t - \frac{kx'}{\sqrt{2}}\right), \quad (1)$$

с силой $F = \frac{3\lambda_{100}}{2m_e} (\cos^2 \beta_1 - \cos^2 \beta_2) \sigma_0 e^{-\alpha r}$

для одноосного напряжения σ вдоль $\vec{r}(\beta_i)$, разлагаем в ряд искомую функцию $u(x', z, t)$ по синусам. Откуда с учетом граничных условий находим искомые коэффициенты (в ряде Фурье):

$$g_{mn}(t) = 2n\pi B \begin{cases} \sin \omega t [\cos \alpha' \cos n\pi - 1] \\ -\cos \omega t \sin \alpha' \cos n\pi \end{cases},$$

¹ Игнатенко Н.М. Механизмы релаксационных явлений в макро- и наноразмерных магнитоэлектроупорядоченных системах в

области линейного отклика: дисс. ... д-ра физ.-мат. наук. Курск, 2009. 384 с.

$$\text{где } B = \frac{4F(1 - \cos m\pi)}{2m(\alpha'^2 - n^2\pi^2)}, \alpha' = \frac{k\ell_{x'}}{\sqrt{2}} = \frac{\ell_{x'}\omega}{\sqrt{2}v}.$$

Отсюда вытекает, что когда $\alpha' = 0$ (волновой вектор упругой волны совпадает с нормалью к ДГ), значения $g_{nm} = 0$ (для четных n), $g_{nm} \neq 0$ (для нечетных n). Для случая $\alpha' \neq 0$ и $\alpha' = (2N + 1)\pi$, где $N = 0, 1, 2, \dots$, будут отличны от нуля g_{mn} и с четными и с нечетными значениями n . Для произвольного случая (для значения α') для четных n коэффициенты Фурье находятся из

$$\begin{aligned} g_{nm} &= -4\pi n B \cos\left(\omega t - \frac{\alpha'}{2}\right) \sin \frac{\alpha'}{2} = \\ &= C_{nm} \cos\left(\omega t - \frac{\alpha'}{2}\right). \end{aligned}$$

Из гармонического анализа следует, что по найденным компонентам Фурье $U_{nm}(x', z, t)$ можно найти фазовые запаздывания δ_{nm} и nm -составляющую Q_{nm}^{-1} .

Отсюда можно сделать вывод, что основной вклад во внутреннее трение определяется низшими гармониками, причем вблизи резонансных частот Q_{nm}^{-1} максимальны.

Таким образом, в случае критических частот, близких к резонансным, для четных гармоник с учетом резонанса ДГ результирующее значение Q^{-1} может быть значительным, что затрудняет выявление (экспериментально) спада $Q^{-1}(\omega)$. Следует иметь в виду, что наличие в магнетиках разных типов ДГ и разброса по их размерам расширяет области как критических частот ω_k , так и резонансных ω_p , к их взаимному перекрытию. В [13; 14] решалась задача о более строгом нахождении резонансной составляющей внутреннего трения, связанного с рассеиванием энергии сегментами ДГ (с учетом его составляющих Q_{nm}^{-1}) за период $T = 2\pi/\omega$, которая равна

$$\Delta W = \int_0^T \dot{U} F \sin(\omega t - \chi) dt, \quad (2)$$

где $U = \sum U_{nm}$, а $\chi = kx'/\sqrt{2}$. Окончательно получается резонансная составляющая

$$Q^{-1} =$$

$$= \frac{\sum_{nm} \dot{U} \sin \delta'_{nm}}{\left[\left(\sum_{nm} \dot{U}_{nm} \cos \delta'_{nm} \right)^2 + \left(\sum_{nm} \dot{U}_{nm} \sin \delta'_{nm} \right)^2 \right]^{1/2}}, \quad (3)$$

$$\text{где } \delta'_{nm} = \delta_{nm} + \frac{\alpha'}{2} - \chi, \quad m = 0, 1, 2, 3, \dots, \text{ а } n = 1, 2, 3, 4, \dots$$

Здесь учтено, что для любых частот будут отличаться от нуля и четные, и нечетные гармоники по n в $g_{nm}(t)$, которые и формируют результирующее внутреннее трение, связанное с осцилляциями ДГ.

Результаты и их обсуждение

Вследствие частотно-размерных эффектов динамический ΔE -эффект оказывается связанным только с процессами обратимых вращений. Это объясняется тем, что для четных n усредненная по ДГ механострикция не оказывает влияния на результат (равна нулю). По усредненной для ДГ компоненте Фурье U_{nm} (при нечетных n) и соответствующей ей механострикции для всех типов не 180° ДГ получается уравнение для нахождения скорости волны через $V_0(\beta_i) = (E_0 / \rho)^{1/2}$ и параметры магнетика и для коэффициента поглощения α и динамического ΔE -эффекта. Отсюда следует, что при $\omega \rightarrow \omega_k$ величина $\alpha \rightarrow 0$, $V \rightarrow V_0$, $\frac{\Delta E}{E} \rightarrow 0$, как и $Q^{-1} \rightarrow 0$, без

учета процессов вращения векторов спонтанной намагниченности. Это имеет место, когда длина упругой волны становится соизмеримой с размером доменной

границы. Тогда нечетные гармоники в разложении смещения ДГ в двойной ряд Фурье обращаются в ноль, а четные приобретают ненулевые значения, способствуя увеличению резонансных потерь. Это, а также большая дисперсия ДГ по их размерам и типу приводят к тому, что результатирующее значение Q^{-1} в этой области ω_k и ω_p частот не будет резко изменяться. Частотно-размерные эффекты более детально можно рассмотреть и с несколько иных позиций. Так как в модели гибкой ДГ её смещение u отстает по фазе от упругого напряжения на некоторый угол, то с учетом этого вводится усредненное фазовое запаздывание для нее по всем гармоникам $\varphi_{\text{ср}}$.

В этом случае ДГ рассматриваем в виде мембраны, которая колеблется под действием только упругой силы $g(x', z, t) e^{-i\varphi_{\text{ср}}}$ без учета диссипации

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \frac{\beta_c}{m} \frac{\partial U}{\partial t} - \frac{\gamma}{m} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x'^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z'^2} \right) + \frac{k}{m} U = g(x', z, t). \quad (4)$$

Уравнение (4) для ДГ $\parallel (110)$ дает собственные решения, соответствующие убыли магнитоупругих потерь. Зануление их возможно при одновременном выполнении условий

$$\sin\left(\frac{k\ell_{x'}}{\sqrt{2}} \pm n\pi\right) = 0 \text{ и } \cos\left(\frac{k\ell_{x'}}{\sqrt{2}} \pm n\pi\right) = 0, \quad (5)$$

что нереально, т. е. реально $g_{nm} = 0$ либо при четных, либо нечетных n . Аналогичное имеет место и для 90° ДГ $\parallel (010)$ для σ -волны с $\vec{k} \parallel [100]$, когда условия зануления среднего смещения этой ДГ примут вид $\ell_x = (2N+1)\lambda/2$, где $N = 0, 1, 2$. Если Δ – разность хода для крайних точек ДГ волнового фронта, то условие для частот, отвечающих минимумам Q^{-1} , будет справедливо при $\alpha\Delta \ll 1$ и определяются эти частоты только размерами ДГ. Условие $\alpha\Delta \ll 1$ в реальных магнетиках достаточно

хорошо выполняется, но с ростом N оно теряет силу и среднее смещение ДГ не равно нулю.

Для железа можно взять $\gamma \approx 0,9 \cdot 10^{-3}$ Дж/м², $m_s \approx 10^{-9}$ кг/м² и $a = \left(\frac{\gamma}{m_s} \right)^{1/2} \approx 0,95 \cdot 10^3$ м/с. В этом случае при $N = 0$, $\ell_{x'} \approx 10^{-2}$ м (наибольший реальный размер) граничная частота будет равна $\nu_{\text{тр}} \equiv \frac{a}{2\ell_{x'}} \approx 0,47 \cdot 10^5$ Гц.

Таким образом, границей применимости теории магнитоупругих потерь, связанных с осцилляциями ДГ для случая $\lambda \gg \ell_x$, будет выполнение условия $\nu \leq \nu_{\text{тр}}$.

Следует иметь в виду, что в реальных кристаллах имеется значительный разброс ℓ_x , ℓ_y , ℓ_z , отличающийся на порядки, что приводит к значительному уширению области граничных частот $\nu_{\text{тр}}$.

Выводы

Исходя из модели жестко закрепленных ДГ, можно заключить, что при определенных частотах, которые обусловлены только размером доменных границ, скоростью упругой волны и ее волновым вектором, в магнетиках происходит минимизация магнитоупругих потерь. В этом случае динамический ΔE -эффект будет приближаться к значению, соответствующему заблокированным ДГ.

Есть также основания считать, что даже при нежестком закреплении доменных границ дефектами частотно-размерные эффекты, описанные выше, будут иметь место и для модели локального закрепления. Следовательно, можно ожидать, что аналогичные эффекты, приводящие к обнулению среднего смещения ДГ в поле асинфазной упругой волны, будут наблюдаться и при отрыве ДГ от мест их закрепления.

Список литературы

1. Киттель М. Физическая теория доменной структуры ферромагнетиков // Успехи физических наук. 1950. Т. XLI, вып. 4. С. 452-544.
2. Волков В.В., Боков В.А. Динамика доменной стенки в ферромагнетиках (Обзор) // Физика твердого тела. 2008. Т. 50, вып. 2. С. 193-221.
3. Петухов Б.В. Эффективная скорость движения доменной границы в квазиодномерной наносистеме при множественном рождении доменов новой фазы // Физика твердого тела. 2018. Т. 60, вып. 6. С. 1238-1242.
4. Сукстанский А.Л., Тарасенко В.В. Динамика доменных границ в ультратонких магнитных пленках // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1977. Т. 12, вып. 4(10). С. 1476-1489.
5. Баръяхтар В.Г., Иванов Б.А., Четкин М.В. Динамика доменных границ в слабых ферромагнетиках // Успехи физических наук. 1985. Т. 146, вып. 3. С. 417–458. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0146.198507b.0417>.
6. Комина О.Ю., Жуков Е.А., Щербаков Ю. Измерение скорости движения доменных границ в YFeO₃ во внешних постоянных магнитных полях // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2016. № 1(40). С. 13-18.
7. Borin D., Stepanov G. Magneto-mechanical properties of elastic hybrid composites // Physical Sciences Reviews. 2020. Vol. 7, is. 10. <https://doi.org/10.1515/psr-2019-0126>.
8. Шавров В.Г., Щеглов В.И. Динамика намагниченности в условиях изменения её ориентации. М.: Физматлит, 2019. 472 с.
9. Шавров В.Г., Бучельников В.Д., Бычков И.В. Связанные волны в магнетиках: монография. М.: Физматлит, 2019. 480 с.
10. Исследование динамики доменной границы GdFeCo методом двукратной высокоскоростной фотографии / К.Н. Prabhakara, Т.Б. Шапаева, В.В. Юрлов, К.А. Звездин, А.К. Звездин, С.С. Davies [и др.] // Физика твердого тела. 2023. Т. 65, вып. 2. С. 248–253.
11. Особенности магнитоупругой СВЧ-динамики трехслойной структуры / Л.Н. Котов, М.Ю. Дианов, В.С. Власов, Ф.Ф. Асадуллин // Известия РАН. Серия физическая. 2022. Т. 86, № 9. С. 1363-1368.
12. Звездин Л.К., Мухин А.А, Попков А.Ф. Магнитоупругие аномалии в динамике доменных границ в слабых ферромагнетиках: препринт ФИАН СССР. М., 1982. №108. 65 с.
13. Родионов А.А., Сергеева О.В. О наклонном падении упругих волн на доменные границы // Релаксационные явления в твердых телах: тезисы докладов XX Международной конференции. Воронеж: Изд-во Воронеж. гос. ун-та, 1999. С. 191-192.
14. Родионов А.А., Сергеева О.В. О резонансе доменных границ в упругих полях // Известия Курского государственного технического университета. 2000. № 4. С. 169-176.
15. Игнатенко Н.М. Особенности диссипации энергии и упругих явлений в магнетиках в области линейного отклика: монография / Юго-Зап. гос. ун-т. Курск, 2013. 154 с.

References

1. Kittel M. The physical theory of the domain structure of ferromagnets. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk = Physics Uspekhi*. 1950;XLI(4):452-544.
2. Volkov V.V., Bokov V.A. Dynamics of the domain wall in ferromagnets (review). *Fizika tverdogo tela = Solid State Physics*. 2008;50(2):193-221. (In Russ.)
3. Petukhov B.V. Effective velocity of the domain boundary in a quasi-one-dimensional nnsystem at multiple birth of domains of a new phase. *Fizika tverdogo tela = Solid State Physics*. 2018;60(6):1238-1242. (In Russ.)

4. Sukstansky A.L., Tarasenko V.V. Dynamics of domain boundaries in ultrathin magnetic films. *Zhurnal eksperimental'noi i teoreticheskoi fiziki = Journal of Experimental and Theoretical Physics*. 1977;12(4):1476-1489. (In Russ.)
5. Baryatinsky V.G., Ivanov B.A., Chetkin M.V. Dynamics of domain faces in weak ferromagnets. *Achievements of the Physical Sciences*. 1985;146(3):417-458. (In Russ.) <https://doi.org/10.3367/UFNr.0146.198507b.0417>
6. Komina O.Yu., Zhukov E.A., Shcherbakov Yu.I. Measuring of domain wall speed in YFE₃ in external permanent magnetic fields. *Vestnik Tikhookeanskogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of the Pacific State University*. 2016;(1):13-18. (In Russ.)
7. Borin D., Stepanov G. Magneto-mechanical properties of elastic hybrid composites. *Physical Sciences Reviews*. 2020;7(10). <https://doi.org/10.1515/psr-2019-0126>. (In Russ.)
8. Shavrov V.G., Shcheglov V.I. Dynamics of magnetization in conditions of changing its orientation. Moscow: Fizmatlit; 2019. 472 p. (In Russ.)
9. Shavrov V.G., Buchelnikov V.D., Bychkov I.V. Related waves in magnets. Moscow: Fizmatlit; 2019. 480 p. (In Russ.)
10. Prabhakara K.H., Shapaeva T.B., Yurlov V.V., Zvezdin K.A., Zvezdin A.K., Davies C.S., et al. Investigation of the dynamics of the GdFeCo domain boundary by the method of double high-speed photography. *Fizika tverdogo tela = Solid State Physics*. 2023;65(2):248-253. (In Russ.)
11. Kotov L.N., Dianov M.Yu., Vlasov V.S., Asadullin F.F. Features of magnetically elastic microwave dynamics of a three-layer structure. *Izvestiya RAN. Seriya fizicheskaya = Izvestia of the Russian Academy of Sciences. Physical series*. 2022;86(9):1363-1368. (In Russ.)
12. Zvezdin L.K., Mukhin A.A., Popkov A.F. Magnetoelastic anomalies in the dynamics of domain boundaries in weak ferromagnets: preprint of the Institute of Physics and Technology of the USSR. No. 108. Moscow; 1982. 65 p. (In Russ.)
13. Rodionov A.A., Sergeeva O.V. On the oblique incidence of elastic waves on domain boundaries. In: *Relaksatsionnye yavleniya v tverdykh telakh: tezisy dokladov XX Mezhdunarodnoi konferentsii = Relaxation Phenomena in Solids. Abstracts of the XX International conference*. Voronezh: Izd-vo Voronezh. gos. un-ta; 1999. P. 191-192. (In Russ.)
14. Rodionov A.A., Sergeeva O.V. On the resonance of domain boundaries in elastic fields. *Izvestiya Kurskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of the Kursk State Technical University*. 2000;(4):169-176. (In Russ.)
15. Ignatenko N.M. Features of energy dissipation and elastic phenomena in magnetics in the linear response region. Kursk: Yugo-Zap. gos. un-t; 2013. 154 p. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the Authors

Петрова Людмила Павловна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры нанотехнологий, микроэлектроники, общей и прикладной физики, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: petrovalp@inbox.ru, ORCID: 0009-0007-8883-5983, SPIN-код: 7656-4073

Lyudmila P. Petrova, Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Associate Professor of the Department of Nanotechnology, Microelectronics, General and Applied Physics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: petrovalp@inbox.ru, ORCID: 0009-0007-8883-5983, SPIN-code: 7656-4073

Игнатенко Николай Михайлович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры нанотехнологий, общей и прикладной физики, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: inmkstu@bk.ru

Солдатов Андрей Александрович, аспирант кафедры нанотехнологий, микроэлектроники, общей и прикладной физики, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: SoldatovAndAl@gmail.com, ORCID: 0009-0003-1108-8511

Nikolay M. Ignatenko, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Professor of the Department of Nanotechnology, Microelectronics, General and Applied Physics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: inmkstu@bk.ru

Andrey A. Soldatov, Postgraduate Student of the Department of Nanotechnology, Microelectronics, General and Applied Physics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: soldatovandal@gmail.com, ORCID: 0009-0003-1108-8511