

УДК 537.87, 537.622.4, 537.226.4

Дисперсионные характеристики гибридных электромагнитно-спиновых волн в структуре магнетонный кристалл — сегнетоэлектрик с учетом магнитной и электрической нелинейности¹

^{1,2} Морозова М. А., ² Матвеев О. В., ² Романенко Д. В.

¹ *Московский физико-технический институт
Институтский переулок, д. 9, г. Долгопрудный, 141701, Россия
matorozovata@yandex.ru*

² *Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского
ул. Астраханская, 83, Саратов, 410012, Россия
olymatveev@gmail.com*

Получено: 11 июля 2019 г.

Отрецензировано: 13 сентября 2019 г.

Принято к публикации: 16 сентября 2019 г.

Аннотация: *Представлены результаты теоретического исследования дисперсионных характеристик гибридных электромагнитно-спиновых волн, распространяющихся в структуре магнетонный кристалл — сегнетоэлектрик. Показано, что в результате фазового синхронизма волн в полосе первого брэгговского резонанса в спектре формируются две запрещенные зоны: основная — брэгговская и дополнительная — гибридная. Исследовано влияние магнитной и электрической нелинейности сред на положение запрещенных зон в спектре распространяющихся волн. Выявлено, что учет магнитной нелинейности приводит к сдвигу обеих запрещенных зон вниз по частоте, учет электрической нелинейности приводит к сдвигу только гибридной запрещенной зоны вверх по частоте.*

Ключевые слова: *магнетонный кристалл, сегнетоэлектрик, мультиферроик, электромагнитно-спиновые волны, брэгговский резонанс, керровская нелинейность.*

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Морозова М. А., Матвеев О. В., Романенко Д. В. Сверхмощная вспышка лазера водяного пара в источнике W49N // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2019. Т. 2, № 3. С. 324—333.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011): Морозова, М. А. Сверхмощная вспышка лазера водяного пара в источнике W49N / М. А. Морозова, О. В. Матвеев, Д. В. Романенко // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2019. Т. 2, № 3. С. 324—333.

¹ Статья является расширенной версией доклада, представленного на 29-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо'2019 (Севастополь, РФ, 8—14 сентября 2019 г.).

Dispersion characteristics of hybrid electromagnetic spin waves in a magnonic crystal – ferroelectric structure with magnetic and electrical nonlinearity

M. A. Morozova^{1,2}, O. V. Matveev², and D. V. Romanenko²

¹ *Moscow Institute of Physics and Technology*

*9, Institutskiy per., Dolgoprudny, 141701, Russian Federation
mamorozovama@yandex.ru*

² *Saratov State University*

*83, Astrakhanskaya St., Saratov, 410012, Russian Federation
olymatveev@gmail.com*

Received: July 11, 2019

Peer-reviewed: September 13, 2019

Accepted: September 16, 2019

Abstract: *The results of a theoretical study of the dispersion characteristics of hybrid electromagnetic-spin waves propagating in the structure of a magnonic crystal - ferroelectric are presented. It is shown that as a result of phase synchronism of waves in the band of the first Bragg resonance, two bandgaps are formed in the spectrum: the main one is the Bragg one and the additional one is hybrid. The influence of the magnetic and electrical nonlinearity of the media on the position of the bandgaps in the spectrum of propagating waves is investigated. It was revealed that taking into account magnetic nonlinearity leads to a shift of both bandgaps down in frequency, taking into account electric nonlinearity leads to a shift of only the hybrid bandgap up in frequency.*

Keywords: *magnonic crystal, ferroelectric, multiferroic, hybrid electromagnetic-spin waves, Bragg resonance, Kerr effect.*

For citation (IEEE): M. A. Morozova et al. “Dispersion characteristics of hybrid electromagnetic spin waves in a magnonic crystal – ferroelectric structure with magnetic and electrical nonlinearity,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 2, no. 3, pp. 324–333, 2019. (In Russ.).

1. Введение

Ферромагнитные материалы широко используются для создания компонентов СВЧ устройств, управление характеристиками которых выполняется посредством изменения внешнего магнитного поля. «Магнитный» способ управления может быть реализован в сравнительно широком

диапазоне частот, но при этом управление осуществляется сравнительно медленно и требует значительного энергопотребления. Другим семейством материалов, применяемых для создания СВЧ управляемых приборов, являются сегнетоэлектрики (СЭ). Для управления характеристиками сегнетоэлектрических компонентов применяется электрическое поле. Изменение диэлектрической проницаемости при приложении электрического поля при «электрическом» способе управления происходит гораздо быстрее по сравнению с «магнитным» управлением. Кроме того, «электрическое» воздействие отличается малым энергопотреблением [1].

Использование композитных мультиферроидных структур на базе ферромагнитных пленок открывает дополнительные возможности по управлению характеристиками волн в таких структурах [2]. Связь между электрической и магнитной подсистемами дает возможность управлять их магнитными свойствами электрическим полем и, наоборот, изменять их электрические свойства в магнитном поле. Первые работы по исследованию композитных мультиферроидных структур, в частности структуры ферромагнитная пленка — сегнетоэлектрик (ФП/СЭ) относятся к 80-м годам прошлого века [3, 4]. При больших значениях диэлектрической проницаемости СЭ, которая зависит от приложенного постоянного электрического поля, электромагнитные волны (ЭМВ) в СЭ оказываются сильно замедленными. В этом случае в структуре ФП/СЭ на частотах, близких к частоте фазового синхронизма, между ЭМВ и спиновыми волнами (СВ) возникают гибридные электромагнитно-спиновые волны (ГЭМСВ). Интерес к таким структурам был возобновлен в связи с развитием технологий производства керамических сегнетоэлектриков (титанат бария (BaTiO_3), титанат стронция (SrTiO_3)) с широким диапазоном перестраиваемой диэлектрической проницаемости [5—7].

Использование периодических мультиферроидных структур типа магнетонный кристалл — сегнетоэлектрик (МК/СЭ) расширяет возможности по управлению характеристиками волн в таких структурах. При этом за счет создания периодического изменения характеристик как сегнетоэлектрической нагрузки, так и ферромагнитной пленки в таких структурах формируются запрещенные зоны. Проводились теоретические и экспериментальные исследования характеристик запрещенной зоны в зависимости от диэлектрической проницаемости СЭ, напряженности электрического и магнитного поля [8—10].

Интенсивная волна, распространяясь в нелинейной среде, может изменять свойства среды. Как было показано ранее [11], мультиферроидные среды, включающие ферромагнитную и сегнетоэлектрическую подсисте-

мы, демонстрируют двойную волновую нелинейность, обусловленную совместным действием нелинейностей каждой из подсистем. До настоящего времени проводились только исследования, направленные на изучение влияния нелинейности на распространение волн в структурах типа ФП/СЭ.

Однако интерес представляет исследование распространения нелинейных сигналов в периодических мультиферроидных структурах. Следует ожидать, что учет нелинейности в этом случае приведет к изменению характеристик запрещенных зон в спектре ГЭМСВ.

2. Модель и численные результаты

В структуре ФП/СЭ в результате фазового синхронизма СВ, распространяющихся в ферромагнетике, и ЭМВ в сегнетоэлектрике происходит расталкивание дисперсионных характеристик данных типов волн: они гибридируются и формируется ГЭМСВ. Рассмотрим структуру магнонный кристалл — сегнетоэлектрик (МК/СЭ) (см. рис. 1). Магнонный кристалл представляет ферромагнитную пленку с намагниченностью насыщения M_0 , толщиной a . На поверхности пленки нанесена периодическая структура с периодом L в виде канавок глубиной $\Delta=a-b$, шириной $c_2=L-c_1$, c_1 — ширина столбика. Предполагается, что в направлении осей x и y структура бесконечна. Система помещена во внешнее магнитное поле \vec{H}_0 , которое направлено вдоль оси x , таким образом в МК вдоль оси y распространяются поверхностные магнитостатические волны (ПМСВ). Слой сегнетоэлектрика толщиной S и диэлектрической проницаемостью ϵ помещен поверх МК. К слою СЭ приложено внешнее электрическое поле напряженности \vec{E}_0 вдоль оси z . Периодичность приводит к формированию отраженных от неоднородностей волн, в результате взаимодействия прямых и отраженных волн в такой структуре формируются запрещенные зоны: области, в которых распространяющиеся волны затухают.

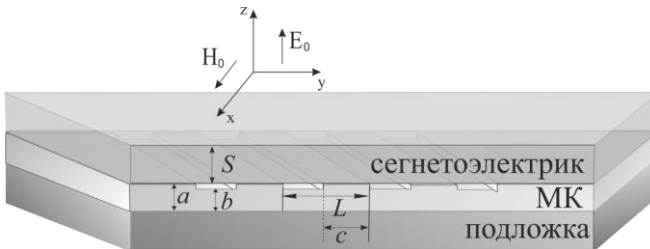


Рис. 1. Схема исследуемой структуры МК/СЭ

Fig. 1. Scheme of studied structure magnonic crystal – ferroelectric

Дисперсионное уравнение для ГЭМСВ в структуре МК/СЭ может быть получено из уравнения для волн в структуре ФП/СЭ [3] с учетом периодической толщины пленки, а также с использованием метода связанных волн [12], и будет иметь вид:

$$\begin{vmatrix} \Omega_0^H & \beta_0^H \\ \beta_{-1}^H & \Omega_{-1}^H \end{vmatrix} = 0, \quad (1)$$

где компоненты $\Omega_{0,-1}^H$, приравненные к нулю, представляют собой дисперсионные соотношения для прямой и отраженной ГЭМСВ в структуре ФП/СЭ:

$$\begin{aligned} \Omega_{0,-1}^H = & \left(-\omega^2 + \omega_{\perp}^2 + \frac{\omega_M^2 k_{0,-1} d_0}{2} \right) \left(-\omega^2 + c^2 \frac{2k_{0,-1}}{\varepsilon S} \right) - \\ & - \frac{\varepsilon d_0 \omega_M \omega^2}{c^2 k_{0,-1}} \left(\omega + \omega_H + \frac{\omega_M}{2} \right), \end{aligned} \quad (2)$$

где $d_0 = a + \Delta c_1 / L$ — эффективная толщина МК, $\omega_H = \gamma H_0$, $\omega_M = 4\pi\gamma M_0$, $\omega_{\perp} = \sqrt{\omega_H(\omega_H + \omega_M)}$, γ — гиромагнитное отношение, $k_{0,-1}$ — волновые числа прямых и отраженных волн, c — скорость света. Коэффициенты $\beta_{0,-1}^H$ определяют связь между прямыми и отраженными волнами и зависят от геометрии периодической ячейки МК [13]:

$$\beta_{0,-1}^H = \frac{d_0 \delta d \omega_M}{2} \left(\frac{\omega_M k_{-1,0}}{2} \left(\frac{c^2}{\varepsilon S} k_{-1,0} - \omega^2 \right) - \frac{\varepsilon \omega^2}{c^2 k_{-1,0}} \left(\omega + \omega_H + \frac{\omega_M}{2} \right) \right) \quad (3)$$

где $\delta d = 2\Delta \sin(\pi c_1 / L) / \pi d_0$.

Увеличение амплитуды волны в ферромагнетике приводит к уменьшению постоянной составляющей намагниченности, что влечет за собой изменение частоты прецессии, которое и приводит к изменению частоты спиновой волны. Будем учитывать магнитную нелинейность среды следующим образом:

$$M = M_0(1 - q |m|^2) = M_0(1 - |u|^2), \quad (4)$$

где M — продольная компонента магнитного момента, $|u|^2 = q |m|^2$ — нормированная амплитуда прецессии намагниченности, пропорциональная мощности входного сигнала, $q = 0.5(1 + \omega_H^2 / \omega_{\perp}^2)$ — коэффициент нелинейности ферромагнитной среды.

В случае электромагнитных волн в диэлектрических волноводах при увеличении напряженности электрического поля волны изменяется диэлектрическая проницаемость:

$$\bar{\epsilon}_N = \bar{\epsilon} + N_\epsilon |\bar{E}|^2, \quad (5)$$

где $\bar{\epsilon}_N$ — относительная диэлектрическая проницаемость СЭ, $\bar{\epsilon}$ — линейная часть диэлектрической проницаемости, N_ϵ — коэффициент нелинейности сегнетоэлектрика, \bar{E} — напряженность электрического поля.

Уменьшение диэлектрической проницаемости при увеличении напряженности электрического поля волны приводит к изменению частоты электромагнитной волны в СЭ.

Связь между безразмерной амплитудой входного сигнала и напряженностью электрического поля в мультиферроидной структуре ФП/СЭ была получена в работе [11] в следующем виде:

$$|E|^2 = C(\omega, k) |u|^2. \quad (6)$$

Для вывода нелинейного закона дисперсии воспользуемся линейным законом дисперсии (1) и подставим в него выражения (4), (5), (6) которые описывают нелинейные свойства среды. На рис. 2а показаны дисперсионные характеристики ГЭМСВ в структуре МК/СЭ, рассчитанные по полученному дисперсионному соотношению, в линейном случае при $|u|^2 = 0.001$ (штриховые кривые) и с учетом магнитной и электрической нелинейностей (сплошные кривые). В линейном случае видно формирование двух запрещенных зон — основной (показана светлой заливкой *b*) и гибридной (показана темной заливкой *c*). При увеличении амплитуды сигнала *u* основная и гибридная запрещенные зоны сдвигаются вниз по частоте.

Рассмотрим влияние амплитуды сигнала на формирование запрещенных зон более детально. На рис. 2б показан фрагмент дисперсионной характеристики ГЭМСВ в области гибридной запрещенной зоны (отмеченный овалом на рис. 1а). Штриховыми кривыми показаны дисперсионные в линейном случае $|u|^2 = 0.001$, сплошными кривыми показаны дисперсионные характеристики с учетом только магнитной нелинейности (сплошные кривые) при $|u|^2 = 0.01$. Из графика видно, что в нелинейном случае дисперсионные характеристики, а также центр запрещенной зоны сдвигаются вниз как по частоте (на 20 МГц), так и в сторону больших волновых чисел (на 1 см^{-1}).

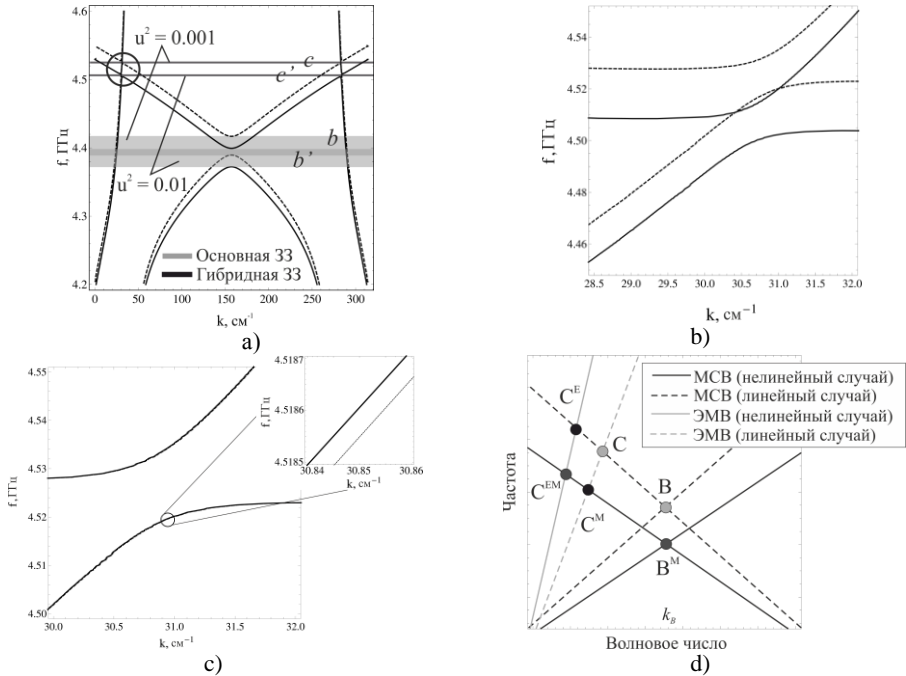


Рис. 2. Дисперсионные характеристики ГЭМСВ в структуре МК/СЭ при $|u|^2=0.01$ (а) с учетом магнитной и электрической нелинейности, (б) с учетом только магнитной нелинейности, (с) с учетом только электрической нелинейности. На всех графиках дополнительно нанесены дисперсионные характеристики в линейном случае при $|u|^2=0.001$ (штриховые кривые), $\epsilon = 4000$, $a = 12$ мкм, $b = 11$ мкм, $L = 200$ мкм, $c = 100$ мкм, $S = 500$ мкм, $H_0 = 860$ Э, $4\pi\gamma M_0 = 1750$ Гс. (d) Схематическое изображение дисперсионных характеристик МСВ в изолированной ФП (темные линии) и ЭМВ в изолированном СЭ (светлые линии). Штриховыми линиями показаны линейные режимы, сплошными — нелинейные.

Fig. 2. HESW dispersion characteristics in MC/FE structure at $|u|^2=0.01$ (a) — with magnetic and electrical nonlinearity, (b) — only magnetic nonlinearity (c) — only electrical nonlinearity. Additional linear dispersion characteristics are shown at $|u|^2=0.001$ (dashed curves), $\epsilon = 4000$, $a = 12 \mu\text{m}$, $b = 11 \mu\text{m}$, $L = 200 \mu\text{m}$, $c = 100 \mu\text{m}$, $S = 500 \mu\text{m}$, $H_0 = 860$ Oe, $4\pi\gamma M_0 = 1750$ Gs (d) Schematic dispersion characteristics of spin waves in isolated ferromagnetic film (dark lines) and electromagnetic waves in isolated ferroelectric (light lines). Dashed lines show linear modes, solid — nonlinear modes

На рис. 2с показан тот же фрагмент дисперсионной характеристики с учетом только электрической нелинейности при $|u|^2=0.01$. Видно, что дисперсионные характеристики, а соответственно, и центр гибридной запрещенной зоны, сдвигаются вверх по частоте примерно на 0.05 МГц и в

сторону малых волновых чисел на 0.005 см^{-1} , т. е. влияние электрической нелинейности противоположно влиянию магнитной. Кроме того видно, что влияние магнитной нелинейности значительно превышает влияние магнитной на положение гибридной запрещенной зоны.

Влияние электрической и магнитной нелинейности может быть объяснено с помощью простых геометрических соображений. На рис. 2d показаны прямые и отраженные ПМСВ в изолированной ФП (темные линии), ЭМВ в изолированном СЭ (светлые линии). Штриховыми линиями показаны линейные режимы, сплошными — нелинейные. В линейном случае точке B будет соответствовать центр основной ЗЗ, а точке C — центр гибридной ЗЗ. При учете только магнитной нелинейности увеличение амплитуды приводит к уменьшению намагниченности МК в соответствии с (2). В результате происходит сдвиг дисперсионных характеристик вниз по частоте, и центр основной запрещенной зоны оказывается ниже по частоте (точка B^M), чем в линейном случае, показанном точкой B . Центр гибридной запрещенной зоны (точка C) сдвигается вниз по частоте и по волновому числу относительно линейного случая и попадает в точку C^M .

При учете только электрической нелинейности при увеличении амплитуды происходит уменьшение значения диэлектрической проницаемости СЭ, в соответствии с соотношением (3) (значение $N_\varepsilon < 0$ характерно для непрозрачных диэлектриков). В результате угол наклона ветви ЭМВ к оси волновых чисел увеличивается. В этом случае положение центра гибридной зоны сдвигается вверх по частоте (точка C^E) и вниз по волновому числу относительно линейного случая, показанного точкой C . На положение центра основной зоны электрическая нелинейность не влияет.

При учете обоих типов нелинейности центр гибридной запрещенной зоны будет расположен, соответственно, в точке C^{EM} , а центр основной зоны — в точке B^M . Видно, что действие электрической нелинейности на положение гибридной запрещенной зоны противоположно действию магнитной нелинейности. Теоретически, действия электрической и магнитной нелинейности могут быть скомпенсированы и сдвига гибридной запрещенной зоны при увеличении амплитуды не произойдет. Величина сдвига запрещенных зон определяется значениями коэффициентов нелинейности q , N_ε и $C(\omega, k)$.

В частности, для структуры на основе пленки ЖИГ (коэффициент нелинейности $q = 0.7$ в магнитном поле $H_0 = 860 \text{ Ое}$) и пластины титаната бария-стронция (БСТ) (характерное значение $N_\varepsilon = -7.696 \cdot 10^{-8}$) коэффициент связи $C(\omega, k) < 10$ во всем диапазоне частот ПМСВ. В связи с чем влияние электрической нелинейности незначительно, как видно из рис. 1а.

4. Заключение

Построена модель, описывающая дисперсионные характеристики ГЭМСВ в структуре МК/СЭ. Запрещенные зоны в такой структуре формируются за счет взаимодействия на частотах фазового синхронизма прямых и отраженных быстрых и медленных ГЭМСВ. Проведен учет двух типов нелинейности в системе — магнитной и электрической. Получено дисперсионное соотношение для ГЭМСВ в структуре МК/СЭ с учетом обоих типов нелинейности и исследовано их влияние на характеристики запрещенных зон. Показано, что учет магнитной нелинейности приводит к сдвигу основной и гибридной запрещенных зон вниз по частоте. Учет электрической нелинейности приводит к сдвигу только гибридной запрещенной зоны вверх по частоте, характеристики основной запрещенной зоны при этом не меняются. Для структуры на основе пленки ЖИГ и пластины БСТ влияние электрической нелинейности незначительно, влияние магнитной нелинейности более существенно и приводит к сдвигу запрещенных зон вниз по частоте на величину порядка 20 МГц.

Таким образом, мультиферроидные структуры на базе магнетонных кристаллов могут быть полезны при разработке систем частотной обработки СВЧ-сигналов в качестве узкополосных фильтров с возможностью электрического управления. Учет нелинейных эффектов позволит уточнить характеристики таких систем в случае распространения сигналов большой мощности.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 19-29-03049-мк).

Список литературы

- 1 Srinivasan G., Dong S., Viehland D., Bichurin M., Nan C. Multiferroic magnetoelectric composites: Historical perspective, status, and future directions // J. Appl. Phys. 2008. Vol. 103. P. 31101.
- 2 Пятаков А. П., Звездин А. К. Магнитоэлектрические материалы и мультиферроики // УФН. 2012. Т. 182. С. 593—620.
- 3 Анфиногенов В. Б., Вербицкая Т. Н., Зильберман П. Е., Мериакри С. В., Огрин Ю. Ф., Тихонов В. В. Гибридные электромагнитно-спиновые волны в контактирующих слоях феррита и сегнетоэлектрика // Радиотехника и электроника. 1989. Т. 34. С. 494—...
- 4 Анфиногенов В. Б., Вербицкая Т. Н., Зильберман П. Е., Мериакри С. В., Огрин Ю. Ф., Тихонов В. В. Резонансное взаимодействие магнитостатических и медленных электромагнитных волн в композитной среде пленка ЖИГ-сегнетоэлектрическая пластина // ПЖТФ. 1986. Т. 12. С. 938—943.
- 5 Demidov V. E., Kalinikos B. A., Edenhofer P. Dipole-exchange theory of hybrid electromagnetic-spin waves in layered film structure // J. Appl. Phys. 2002. Т. 91. С. 10007.

- 6 Fetisov Y. K., Srinivasan G. Electrically tunable ferrite-ferroelectric microwave delay lines // *Appl. Phys. Lett.* 2002. Vol. 91. P. 10007.
- 7 Устинов А. Б., Калинико́с Б. А., Сринивасан Г. Нелинейный сверхвысокочастотный фазовращатель на электромагнитно-спиновых волнах // *ЖТФ.* 2014. Т. 84, вып. 9. С. 146—148.
- 8 Морозова М. А., Шараевский Ю. П., Никитов С. А. Управление запрещенными зонами в слоистой структуре магнетонный кристалл — сегнетоэлектрик // *Радиотехника и электроника.* 2014. Т. 59, № 5. С. 510—516.
- 9 Устинова И. А., Никитин А. А., Устинов А. Б. Динамический магнетонный кристалл на основе феррит-сегнеэлектрической слоистой структуры // *ЖТФ.* 2016. Т. 86, № 5. С. 155—158.
- 10 Устинов А. Б., Калинико́с Б. А. Мультиферроидные периодические структуры на основе магнетонных кристаллов для электронно-перестраиваемых сверхвысокочастотных устройств // *ПЖТФ.* 2014. Т. 40, № 13. С. 58—65.
- 11 Черкасский М. А., Никитин А. А., Калинико́с Б. А. Теория мультинелинейных сред и ее приложение к солитонным процессам в феррит-сегнетоэлектрических структурах // *ЖЭТФ.* 2016. Т. 149, вып. 4. С. 839—847.
- 12 Kashyap R. *Fiber Bragg Gratings.* San Diego : Academic press, 1999. 458 pp.
- 13 Морозова М. А., Матвеев О. В., Шараевский Ю. П., Никитов С. А. Управление запрещенными зонами в слоистой структуре магнетонный кристалл — сегнетоэлектрик — магнетонный кристалл // *ФТТ.* 2016. Т. 58, № 2. С. 266—272.

Информация об авторах

Морозова Мария Александровна, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный, Российская Федерация; доцент кафедры нелинейной физики, Саратовский государственный университет, г. Саратов, Российская федерация. ORCID 0000-0003-4442-2443.

Матвеев Олег Валерьевич, младший научный сотрудник, Саратовский государственный университет, г. Саратов, Российская федерация.

Романенко Дмитрий Владимирович, ассистент кафедры нелинейной физики, Саратовский государственный университет, г. Саратов, Российская федерация.

Information about the authors

Maria A. Morozova, PhD in physics and mathematics, senior scientific researcher, Dolgoprudny, Russian Federation, associate professor of department of nonlinear physics, Saratov State University, Saratov, Russian Federation. ORCID 0000-0003-4442-2443.

Oleg V. Matveev, junior scientific researcher, Saratov State University, Saratov, Russian Federation.

Dmitrii V. Romanenko, assistant of department of nonlinear physics, Saratov State University, Saratov, Russian Federation.