

ВЛИЯНИЕ ЗАЗОРА МЕЖДУ СЛОЯМИ ФЕРРИТА И СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКА В МУЛЬТИФЕРРОИДНОЙ СТРУКТУРЕ КОНЕЧНОЙ ШИРИНЫ НА СВОЙСТВА СОБСТВЕННЫХ ГИБРИДНЫХ ВОЛН*

К. В. Бубликов, А. В. Садовников, М. А. Константинова, С. Е. Шешукова

Саратовский государственный университет

Рассмотрена слоистая мультиферроидная структура типа феррит–сегнетоэлектрик, ограниченная в поперечном направлении. Исследовано влияние воздушного зазора между слоями волноведущей структуры на свойства поперечных мод гибридных волн, образованных в результате взаимодействия волн парциальных систем. С помощью решения электродинамической задачи методом конечных элементов показано, что с увеличением расстояния между ферритом и сегнетоэлектриком связь между волнами парциальных систем ослабевает ввиду уменьшения перекрытия их электромагнитных полей. Полученные данные могут быть использованы для объяснения экспериментальных результатов, поскольку при создании феррит-сегнетоэлектрических слоистых структур возможно появление воздушного зазора между слоями.

Ключевые слова: Мультиферроидная структура, слоистая структура, феррит, поперечные моды, гибридизация волн, метод конечных элементов.

Введение

В настоящее время представляется перспективной разработка устройств СВЧ-диапазона на основе слоистых структур феррит–сегнетоэлектрик (мультиферроидных структур) [1]. В таких направляющих системах имеется возможность управлять свойствами распространяющихся в них волн вариацией приложенных внешних статических магнитного и электрического полей. Активно проектируются фильтры, фазовращатели, ответвители мощности и другие устройства, чему посвящено множество теоретических и экспериментальных работ (см., например, [2–4]).

При создании экспериментальных макетов существует два основных метода изготовления слоистых структур: напыление слоя сегнетоэлектрика, либо закрепление пленки вариконда на поверхности феррита [5,4]. Первый метод имеет преимущество ввиду отсутствия зазора в структуре и невозможности смещения слоев

*Статья написана по материалам доклада, прочитанного на XVI Международной зимней школе-семинаре по радиофизике и электронике СВЧ. Саратов, Россия, 2–7 февраля 2015.

относительно друг друга. Однако в случае изготовления магнотно-кристаллических структур оказывается невозможным создание сегнетоэлектрической нагрузки путем напыления на поверхность, ввиду наличия периодической структуры на поверхности магнитной пленки. Данное обстоятельство приводит к необходимости изучения влияния воздушного зазора на результаты эксперимента. Имея ввиду в перспективе разработку миниатюрных гиротропных направляющих структур сложной формы необходимо учитывать поперечные (ширинные) моды, распространяющиеся в таких системах. Ввиду того, что для волноведущих структур с гиротропными средами уравнения Максвелла не распадаются на системы ТМ- и ТЕ-волн [6], электродинамическую задачу следует решать численно, например, методом конечных элементов (МКЭ) [7].

В данной работе приводятся результаты детального изучения влияния воздушного зазора между слоями феррита и сегнетоэлектрика в мультиферроике на свойства гибридных волн, распространяющихся в такой структуре.

1. Модель структуры

Рассмотрим структуру (рис. 1), состоящую из пленки железо-иттриевого граната (ЖИГ) толщиной 20 мкм, выращенной на поверхности галлий-гадолиниевого граната (ГГГ) толщиной 500 мкм. ЖИГ сверху нагружен пленкой сегнетоэлектрика толщиной 300 мкм, расстояние между слоями ЖИГ и сегнетоэлектрика (обозначим его как d) при численном моделировании изменялось. Ширина всех пленок слоистой структуры составляла 2 мм. Постоянное магнитное поле направлено касательно к ферриту в поперечном направлении (в направлении оси x). При этом в пленке ЖИГ могут распространяться поверхностные волны [6]. Расчётной областью для решения задачи с помощью МКЭ являлось поперечное сечение волновода (направление распространения волны перпендикулярно сечению: $k \updownarrow z$). В настоящее время большинство волноведущих устройств в магнетоэлектронике являются открытыми планарными. Поэтому для моделирования открытой структуры с целью минимизации влияния граничных условий на результаты расчетов левая и правая границы расчетной области (магнитные стенки не отмечены на рис. 1) были расположены от краев пленки ЖИГ на расстоянии, равном ширине самой пленки (по 2 мм).

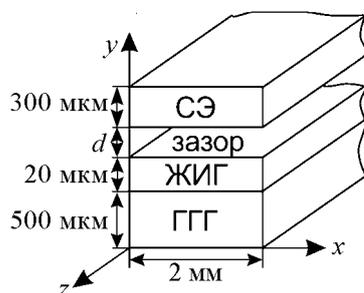


Рис. 1. Схематическое изображение исследуемой волноведущей структуры

Расстояние до верхней металлической стенки от поверхности сегнетоэлектрика составляло 700 мкм, что обеспечивало отсутствие значительного влияния верхней границы при уменьшении этого расстояния в случае подъема блока сегнетоэлектрика для моделирования зазора в мультиферроике. Расстояние от нижней границы феррита до нижней металлической стенки составляло 600 мкм (верхняя и нижняя границы тоже не отмечены на рис. 1).

При такой постановке задачи рассматриваемые волны в структуре являлись квази-ТЕ-волнами, с преобладающими электрическими компонентами в направлении распространения (далее приставку квази- будем опускать). Поперечные моды характеризуются номером n , равным числу вариаций электрического поля по ширине волновода. Электродинамический расчет аналогичной структуры, проведенный авторами ранее [8], показывает, что имеется область частот, где происходит эффективное взаимодействие электромагнитных волн парциальных систем, рассчитанных независимо для диэлектрического и ферритового волноводов. При этом в слоистой структуре распространяются гибридные ТЕ-волны, дисперсионные характеристики которых с удалением от области пересечения дисперсионных кривых ферритового и диэлектрического волноводов асимптотически стремятся к дисперсионным кривым волн в парциальных системах с соответствующими номерами n мод (первая мода к первой, вторая мода ко второй и т.д.).

2. Результаты расчета

Рассмотрим влияние зазора в мультиферроидной структуре на свойства распространяющихся в ней гибридных волн. Материальные параметры для численного моделирования соответствовали значениям используемых в экспериментальных исследованиях пленок ЖИГ и сегнетоэлектрика (см., например, [3,5,9]). Значение диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрического слоя устанавливалось равным $\varepsilon_{СЭ} = 8000$, что соответствует материалу ВК-8 [9]. Диэлектрическая проницаемость слоя ГГГ составляла $\varepsilon_{ГГГ} = 9.0$. Диэлектрическая проницаемость пленки ЖИГ полагалась равной $\varepsilon_{ЖИГ} = 12.7$, тензор магнитной проницаемости $\hat{\mu}$ и зависимость компонент тензора от частоты f определялись соотношениями [6]

$$\hat{\mu} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \mu(f) & i\mu_a(f) \\ 0 & -i\mu_a(f) & \mu(f) \end{bmatrix}, \quad \mu(f) = \frac{f_H(f_H + f_M) - f^2}{f_H^2 - f^2}, \quad \mu_a(f) = \frac{f_M f}{f_H^2 - f^2},$$

где $f_M = \gamma 4\pi M_0 = 4.9$ ГГц; $f_H = \gamma H_0 = 3.64$ ГГц; $\gamma = 2.8$ МГц/Э – гиромагнитное отношение в ЖИГ; $H_0 = 1300$ Э – напряженность внешнего постоянного магнитного поля; $M_0 = 1750/(4\pi)$ Гс – намагниченность насыщения пленки ЖИГ; $\sqrt{f_H(f_H + f_M)} = f_{\perp} = 5.57$ ГГц – частота ферромагнитного резонанса в касательно намагниченной ферритовой пленке, являющаяся нижней отсечкой магнитостатической волны в ферритовом волноводе [10].

Рассмотрим приведенные на рис. 2 дисперсионные характеристики волн в парциальных системах на примере низших нечетных поперечных мод ($n = 1, 3$) ферритового и диэлектрического волноводов. Данные моды выбраны для рассмотрения из-за наибольшей эффективности возбуждения в эксперименте [11]. Здесь: ТЕ_{СЭ1} и ТЕ_{СЭ3} – первая и третья моды сегнетоэлектрического волновода как парциальной системы; ТЕ_{ЖИГ1} и ТЕ_{ЖИГ3} – аналогично для ферритового волновода как парциальной системы; ТЕ_{ОС-ж1} и ТЕ_{ОС-ж3} – первая и третья моды слоистой структуры (зазор $d = 0$ мкм), с ростом частоты соответствующие волнам сегнетоэлектрического волновода; ТЕ_{ОЖ-с1} и ТЕ_{ОЖ-с3} – первая и третья моды слоистой структуры (зазор $d = 0$ мкм), с ростом частоты соответствующие волнам ферритового волновода; при

наличия зазора $d = 300$ мкм аналогичные моды слоистых структур обозначены как $TE_{300C-J1}$ и $TE_{300C-J3}$ и $TE_{300J-C1}$ и $TE_{300J-C3}$.

Вблизи области пересечения дисперсионных кривых волн, распространяющихся в пленке ЖИГ и сегнетоэлектрике, наблюдается связь этих волн, приводящая к образованию гибридных волн в слоистой структуре (см. рис. 2) с хорошо известным эффектом расталкивания [12]. При этом наиболее эффективно взаимодействуют поперечные моды одинаковых номеров. Возникновение воздушного зазора толщиной 300 мкм между слоями сегнетоэлектрика и феррита приводит к тому, что область взаимодействия парциальных систем (по частотам и волновым числам) значительно сужается к точке пересечения соответствующих мод волн парциальных систем.

Кривые с малыми углами наклона к оси абсцисс соответствуют волнам в ферритовом волноводе, с большими углами – в диэлектрическом волноводе. Наибольший интерес представляют ветви дисперсионных характеристик гибридных волн, с ростом k асимптотически переходящие в волну ферритового волновода, так как именно эти типы волн возбуждаются в эксперименте. Рассмотрим детальнее влияние зазора на данную дисперсионную ветвь первой поперечной моды гибридной волны.

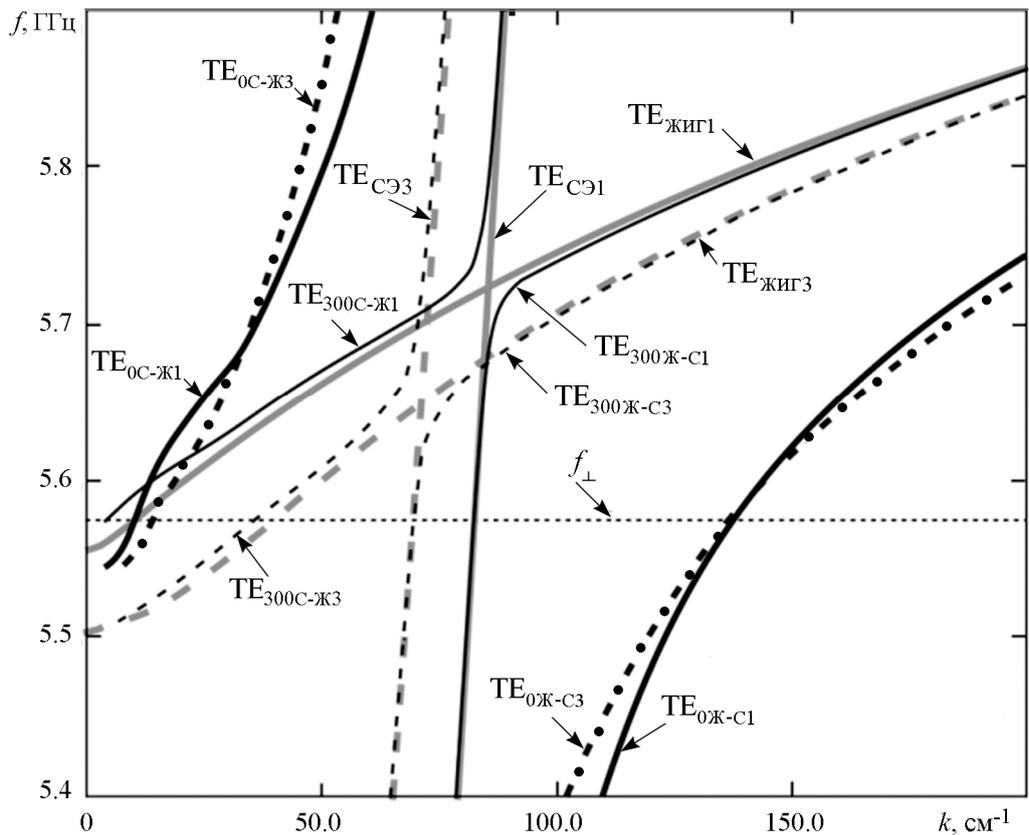


Рис. 2. Дисперсионные характеристики волн парциальных систем и гибридных волн в слоистой структуре без зазора и с зазором между слоями мультиферроика

На рис. 3 представлены результаты расчета дисперсионных характеристик первой поперечной моды в рассматриваемой слоистой структуре в зависимости от толщины воздушного зазора между слоями ЖИГ и сегнетоэлектрика. Видно, что максимальный эффект гибридации проявляется при $d = 0$ мкм, когда перекрытие полей парциальных систем максимально. С увеличением зазора между слоями ЖИГ и сегнетоэлектрика дисперсионная кривая первой поперечной моды гибридной волны смещается вверх по частоте. Очевидно, что в предельном случае ($d \rightarrow \infty$) будет наблюдаться отсутствие взаимодействия волн ферритового и сегнетоэлектрического волноводов, при котором дисперсионная кривая будет соответствовать первой поперечной моде волны ферритового волновода.

На рис. 4 приведена разница по частоте Δf между дисперсионной веткой первой моды волны ферритового волновода и первой модой гибридной волны слоистой структуры. Видно, что влияние зазора на частотную разницу носит нелинейный характер. Это вызвано экспоненциальным распределением электромагнитных полей ТЕ-волн по толщине пленки ЖИГ. На вставке рис. 4 приведено распределение $|E|$ в расчетной области, из которого хорошо видна локализация полей с расположением максимумов в областях феррита и сегнетоэлектрика и перекрытие напряженностей электрического поля волн парциальных систем в области зазора.

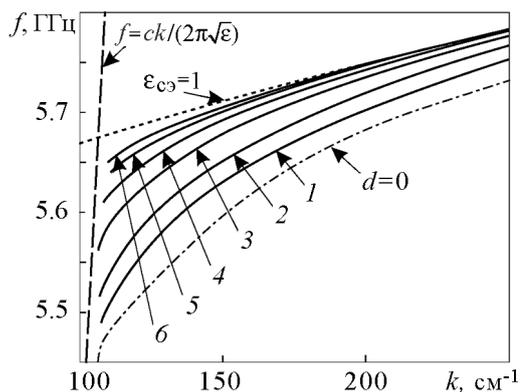


Рис. 3. Зависимость дисперсионной характеристики первой поперечной моды от ширины зазора d , мкм: 1 – 10, 2 – 20, 3 – 40, 4 – 60, 5 – 80, 6 – 100; пунктирная линия – дисперсионная кривая первой поперечной моды ферритового волновода ($\epsilon_{сэ} = 1$, сегнетоэлектрический слой отсутствует); штрих-пунктирная линия – дисперсионная кривая первой поперечной моды слоистой структуры (зазор отсутствует); штриховая линия – закон дисперсии в безграничной среде ($\epsilon = 8000$)

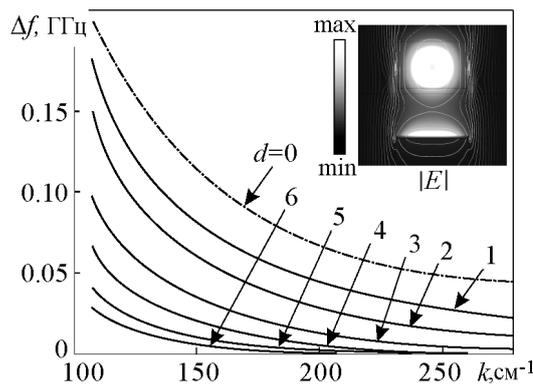


Рис. 4. Зависимость частотной разницы между дисперсионной кривой первой поперечной моды ферритового волновода и первой поперечной моды гибридной волны слоистой структуры без зазора ($d = 0$) и для разных толщин зазора d , мкм: 1 – 10, 2 – 20, 3 – 40, 4 – 60, 5 – 80, 6 – 100. На вставке приведено распределение $|E|$ в расчетной области для случая зазора $d = 300$ мкм

Выводы

На основе полученных результатов выявлены основные особенности влияния зазора в мультиферроике на свойства гибридных волн, распространяющихся в мультиферроидной структуре. Показано, что с увеличением зазора уменьшается область взаимодействия поперечных мод парциальных систем, а разница по частоте между

волной в ферритовом слое и гибридной волной падает. Данные особенности важно учитывать при конструировании макетов слоистых структур феррит– сегнетоэлектрик и при интерпретации экспериментальных результатов, полученных на макетах с зазорами. Вследствие уменьшения области взаимодействия между поперечными модами парциальных систем введение зазора может быть использовано для детального изучения особенностей формирования гибридных волн с учетом многомодового характера их распространения.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (гранты № 13-07-12409, 14-02-00976, 13-02-00732), РНФ (14-19-00760) и стипендий президента РФ (СП-313.2015.5, СП-1551-2013.5).

Библиографический список

1. Schmid H. Multi-ferroic magnetoelectrics // *Ferroelectrics*. 1994. Vol. 162. P. 317.
2. Никитин А.А., Устинов А.Б., Семенов А.А., Калиникос Б.А. Планарный тонкопленочный феррит-сегнетоэлектрический СВЧ-фазовращатель // *Письма в ЖТФ*. 2014. Т. 40, вып. 7. С. 1.
3. Устинов А.Б., Калиникос Б.А. Мультиферроидные периодические структуры на основе магнетонных кристаллов для электронно-перестраиваемых сверхвысоко-частотных устройств // *Письма в ЖТФ*. 2014. Т. 40, вып. 13. С. 58.
4. Nikitin A.A., Ustinov A.B., Semenov A.A., Kalinikos B.A., Lahderanta E. All-thin-film multilayered multiferroic structures with a slot-line for spin-electromagnetic wave devices// *Applied Physics Letters*. 2014. Vol. 104. P. 093513.
5. Демидов В.Е., Калиникос Б.А., Кармаленко С.Ф., Семенов А.А., Эденхофер П. Дисперсионные характеристики поверхностных электромагнитно-спиновых волн в слоистых структурах феррит–сегнетоэлектрик–диэлектрик–металл// *Письма в ЖТФ*. 2002. Т. 28, вып. 11. С. 75.
6. Гуревич А.Г. Магнитный резонанс в ферритах и антиферромагнетиках. М.: Наука, 1973.
7. Lon Y., Koshiba M. Evaluations of loss factor of multilayered inhomogeneous waveguides for magnetostatic wave using efficient finite element formalism// *IEEE Trans.* 1989. Vol. 37, № 4. P. 680.
8. Садовников А.В., Бубликов К.В., Бегинин Е.Н., Никитов С.А. Электродинамические характеристики слоистой структуры металл–диэлектрик– сегнетоэлектрик–диэлектрик–металл конечной ширины // *Радиотехника и электроника*. 2014. № 59. С. 876.
9. Вербницкая Т.Н. Вариконды. М.–Л.: Государственное энергетическое изд-во. 1958. 65 с.
10. Damon R.W., Eshbach J.R. Magnetostatic modes of a ferromagnet slab // *J. Phys. Chem. Solids*. 1961. Vol. 19. P. 308.
11. Vajrai S.N. Excitation of magnetostatic surface waves: Effect of finite sample width// *J. Appl. Phys.* 1985. Vol. 52. P. 910.
12. Демидов В.Е., Калиникос Б.А. Спектр дипольно-обменных спиновых волн в касательно намагниченных слоистых структурах металл–сегнетоэлектрик–ферромагнетик–сегнетоэлектрик–металл // *Письма в ЖТФ*. 2000. Т. 26, вып. 7. С. 8.

References

1. *Schmid H.* // *Ferroelectrics*. 1994. Vol. 162. P. 317.
2. *Nikitin A.A., Ustinov A.B., Semenov A.A., Kalinikos B.A.* // *Technical Physics Letters*. 2014. Vol. 40, № 4. P. 277.
3. *Ustinov A.B., Kalinikos B.A.* // *Technical Physics Letters*. 2014. Vol. 40, № 7. P. 568.
4. *Nikitin A.A., Ustinov A.B., Semenov A.A., Kalinikos B.A., Lahderanta E.* // *Applied Physics Letters*. 2014. Vol. 104. P. 093513.
5. *Demidov V.E., Kalinikos B.A., Karmanenko S.F., Semenov A.A., Edenhofer P.* // *Technical Physics Letters*. 2002. Vol. 28, № 6. P. 479.
6. *Gurevich A.G.* *Magnetic resonance in ferrites and antiferromagnets*. Moscow: Nauka, 1973. 591 p. (In Russian).
7. *Long Y., Koshiba M.* // *IEEE Trans.* 1989. Vol. 37, № 4. P. 680.
8. *Sadovnikov A.V., Bublikov K.V., Beginin E.N., Nikitov S.A.* // *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2014. № 9. P. 914.
9. *Verbitskaya T.N.* *Variconds*. Moscow–Leningrad: State Energy Publishing, 1958. 65 p. (In Russian).
10. *Damon R.W., Eshbach J.R.* // *J. Phys. Chem. Solids*. 1961. Vol. 19. P. 308.
11. *Bajpai S.N.* // *J. Appl. Phys.* 1985. Vol. 52. P. 910.
12. *Demidov V.E., Kalinikos B.A.* // *Technical Physics Letters*. 2000. Vol. 26, № 4. P. 272.

Поступила в редакцию 10.04.2015
После доработки 18.05.2015

TRANSFORMATION OF EIGENMODES SPECTRUM OF FINITE WIDTH MULTIFERROIC STRUCTURE DUE TO TUNING OF THE GAP BETWEEN FERRITE AND FERROELECTRIC LAYERS

K. V. Bublikov, A. V. Sadovnikov, M. A. Konstantinova, S. E. Sheshukova

Saratov State University

We consider a layered multiferroic structure consists of laterally confined ferrite and ferroelectric layers. We study the influence of the air gap between the layers on properties of transverse modes of hybrid waves. By the solution of the electrodynamic problem with the finite element method we show that with increasing of distance between the ferrite and ferroelectric layer the coupling between the waves of these partial systems weakened. These results can be used to explain the experimental data obtained on the layered structure. In the fabrication process of such structures the air gap between the layers may appear. The artificial weakening of the interaction of waves is also useful for a detailed study of the impact of the phenomenon of hybridization on the separate transverse modes.

Keywords: Multiferroic structure, layered structure, ferrite, transverse modes, hybridization phenomenon, finite elements method.



Бубликов Константин Владимирович – родился в Энгельсе (1991). Защитил диплом инженера по специальности «радиофизика и электроника» (2013) факультета нелинейных процессов Саратовского государственного университета. Постоянный участник научных конференций. Опубликовал несколько статей в соавторстве по численным расчетам дисперсионных характеристик в направляющих структурах с гиротропными средами. Магистрант факультета нелинейных процессов по специальности «радиофизика», инженер лаборатории магнитных явлений.

410012 Саратов, Астраханская ул., 83
Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского
E-mail: olorin91@mail.ru



Садовников Александр Владимирович – родился в Саратове (1987). Окончил с красным дипломом факультет нелинейных процессов Саратовского государственного университета, поступил в аспирантуру (2009) по специальностям «радиофизика» и «оптика». Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (2012, СГУ). Работает ассистентом на кафедре «Электроника, колебания и волны».

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



Константинова Мария Алексеевна – родилась в Саратове (1995). Студентка второго курса факультета нано- и биомедицинских технологий Саратовского государственного университета по специальности «электроника и наноэлектроника». Участник нескольких научных конференций.

410012 Саратов, Астраханская ул., 83
Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского
E-mail: marycale13@gmail.com



Шешукова Светлана Евгеньевна – родилась в Саратове (1987), окончила Саратовский государственный университет (2009), защитила диссертацию на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по теме «Нелинейные магнитостатические волны в слоистых ферромагнитных структурах и магнитных кристаллах» (2012, СГУ). В настоящее время занимает должность ассистента на кафедре физики открытых систем факультета нелинейных процессов СГУ. Область научных интересов – волновые явления в тонких ферромагнитных пленках, физика магнитных явлений, нелинейные процессы в ферромагнетиках. Имеет ряд публикаций по данной тематике.

410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
E-mail: SheshukovaSE@ya.ru