

# ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

УДК 621.372:537.874

DOI: 10.34680/2076-8052.2023.5(134).773-779

ГРНТИ 47.43+29.35.19

Специальность ВАК 1.3.8

Научная статья

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СДВИГА ЛИНИИ ФЕРРОМАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА ОТ ПАРАМЕТРОВ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИКОВ

Лобекин В. Н., Бичурин М. И., Кафаров Р. Г., Петров Р. В.

Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого  
(Великий Новгород, Россия)

**Аннотация** В данной работе исследована зависимость сдвига линии ферромагнитного резонанса в слоистых структурах на основе железо-иттриевого граната (ЖИГ) на подложке гадолиний-галиевого граната (ГГГ) от величины внешнего электрического поля и параметров различных пьезоэлектриков (цирконат-титанат свинца (ЦТС), Лангасит). Активное развитие современной СВЧ-техники приводит к исследованию и созданию новых слоистых структур из материалов, обладающих различными физическими свойствами, которые можно комбинировать: магнитные и сегнетоэлектрические, магнитные и полупроводниковые и т.д. В результате исследования получены зависимости сдвигов линии ферромагнитного резонанса от параметров пьезоэлектриков (в основном, от величины диэлектрической проницаемости) в слоистых структурах ЖИГ-ГГГ-ЦТС, ЖИГ-ГГГ-Лангасит. Полученные результаты показывают, что эффект сдвига линии ферромагнитного резонанса можно использовать для разработки новых управляемых СВЧ-устройств, принцип работы которых основан на электронной перестройке резонансных характеристик с помощью электрического поля и выборе типа пьезоэлектрика.

**Ключевые слова:** сдвиг резонансной линии, ферромагнитный резонанс, пьезоэлектрик, железо-иттриевый гранат

**Для цитирования:** Лобекин В. Н., Бичурин М. И., Кафаров Р. Г., Петров Р. В. Исследование зависимости сдвига линии ферромагнитного резонанса от параметров пьезоэлектриков // Вестник НовГУ. 2023. 5(134). 773-779. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.5(134).773-779

Research Article

## INVESTIGATION OF THE DEPENDENCE OF THE SHIFT OF THE FERROMAGNETIC RESONANCE LINE ON THE PARAMETERS OF PIEZOELECTRIC

Lobekin V. N., Bichurin M. I., Kafarov R. G., Petrov R. V.

Yaroslav-the-Wise Novgorod State University (Veliky Novgorod, Russia)

**Abstract** In this research, we study the dependence of the shift of the ferromagnetic resonance line in layered structures based on yttrium iron garnet (YIG) on a gadolinium gallium garnet (GGG) substrate, on the magnitude of the external electric field and on the parameters of various piezoelectrics (plumbum zirconate titanate (PZT), Langasite)). The intense development of modern microwave technology leads to the study and creation of new layered structures of materials with different physical properties that can be combined: magnetic and ferroelectric, magnetic and semiconductor, etc. As a result of the study, we obtained the dependences of the shifts of the ferromagnetic resonance line on the parameters of piezoelectrics (mainly, on the magnitude of the dielectric constant) in the layered structures YIG-GGG-PZT, YIG-GGG-Langasite. The obtained results show that the ferromagnetic resonance line shift effect can be used to develop new controllable microwave devices, the operating principle of which is based on the electronic tuning of resonance characteristics by means of an electric field and the choice of the type of piezoelectric.

**Keywords:** resonance line shift, ferromagnetic resonance, piezoelectric, yttrium iron garnet

**For citation:** Lobekin V. N., Bichurin M. I., Kafarov R. G., Petrov R. V. Investigation of the dependence of the shift of the ferromagnetic resonance line on the parameters of piezoelectric // Vestnik NovSU. 2023. 5(134). 773-779. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.5(134).773-779

## Введение

Разработка управляемых СВЧ-устройств на основе слоистых феррит-пьезоэлектрических структур, принцип работы которых основан на электронной перестройке резонансных характеристик с помощью электрического поля, является перспективным и актуальным направлением в конструировании и технологии СВЧ-техники [1]. За счет приложения электрического поля к пьезоэлектрической фазе слоистой структуры происходит деформация пьезоэлектрика, которая в свою очередь приводит к деформации ферромагнитного материала, в результате чего наблюдается сдвиг линии ферромагнитного резонанса [2].

Ферромагнитный резонанс (ФМР), одна из разновидностей электронного магнитного резонанса, проявляется в избирательном поглощении ферромагнетиком энергии электромагнитного поля при частотах, совпадающих с собственными частотами прецессии магнитных моментов электронной системы ферромагнитного образца во внутреннем эффективном магнитном поле  $H_{\text{эфф}}$ . ФМР в более узком смысле — возбуждение колебаний типа однородной (во всем объеме образца) прецессии вектора намагниченности  $J$  (спиновых волн с волновым вектором  $k=0$ ), вызываемое магнитным СВЧ-полем  $H$ , перпендикулярным постоянному намагничивающему полю  $H_0$  [3].

Использование данного эффекта позволяет перейти к разработке большого ряда активных и пассивных СВЧ-устройств.

## Структуры

В качестве резонаторов использованы слоистые феррит-пьезоэлектрические структуры. В качестве магнитострикционной фазы использовался феррит ЖИГ на подложке ГГГ, в качестве пьезоэлектрической фазы — пьезокерамика ЦТС-19 и кристаллический пьезоэлектрик Лангасит. Структуры представлены на рисунке 1.

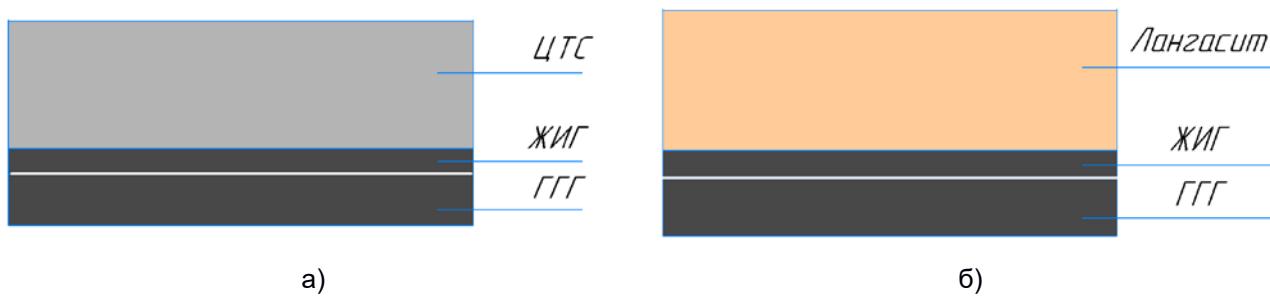


Рисунок 1. Слоистые феррит-пьезоэлектрические структуры:  
а) структура ЖИГ-ГГГ-ЦТС, б) структура ЖИГ-ГГГ-Лангасит

В таблице 1 представлены размеры исследуемых структур.

Таблица 1. Размеры слоистых феррит-пьезоэлектрических структур

№ структуры	Размеры феррита, диск	Размеры пьезоэлектрика, пластина
1	ЖИГ-ГГГ, s=0,35 мм; D=1,82 мм	ЦТС, 5x5x0,5 мм
2	ЖИГ-ГГГ, s=0,37 мм; D=2,76 мм	ЦТС, 5x5x0,5 мм
3	ЖИГ-ГГГ, s=0,35 мм; D=1,82 мм	Лангасит, 10x5x0,2 мм
4	ЖИГ-ГГГ, s=0,37 мм; D=2,76 мм	Лангасит, 10x5x0,5 мм

К магнитострикционной фазе слоистой феррит-пьезоэлектрической структуры прикладывалось постоянное магнитное поле  $H_0$ , в результате чего наблюдается ферромагнитный резонанс. К пьезоэлектрической фазе прикладывалось постоянное электрическое поле, в результате чего происходит деформация пьезоэлектрической фазы, которая передается на магнитострикционную фазу, в результате чего происходит изменение резонансного магнитного поля. Сдвиг резонансного магнитного поля для слоистых структур ЖИГ-ГГГ-ЦТС определяется выражением [4]:

$$\delta H_E = \frac{3\lambda_{111} m_{T_3}}{M_0} = AE_3, \quad (1)$$

где магнитоэлектрическая константа определяется формулой:

$$A = \frac{3\lambda_{111}}{M_0} \left[ \frac{\left( \frac{2 p_{c_{13}} e_{31}}{p_{c_{11}} + p_{c_{12}}} - e_{33} \right)}{\left[ 1 + \frac{m_v}{p_v} \left( \frac{1}{3 m_{c_{44}}} + \frac{1}{3(m_{c_{11}} + 2 m_{c_{12}})} \right) \left( p_{c_{33}} - 2 \frac{p_{c_{13}}^2}{p_{c_{11}} + p_{c_{12}}} \right) \right]} \right] \quad (2)$$

$M_0$  – намагниченность насыщения магнитострикционного слоя.

### Исследование зависимости сдвига линии ферромагнитного резонанса от параметров пьезоэлектриков

Исследование проводилось на измерительном стенде, представленном на рисунке 2, состоящем из спектрометра MS5000X и компьютера, с установленным программным обеспечением для работы со спектрометром.

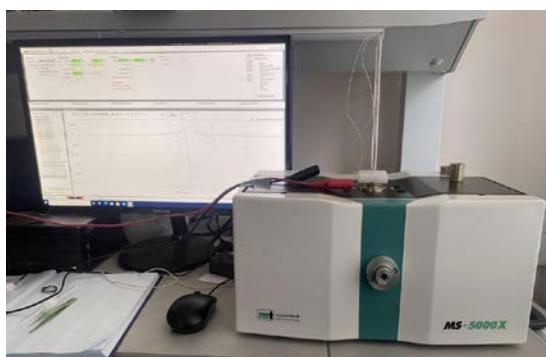
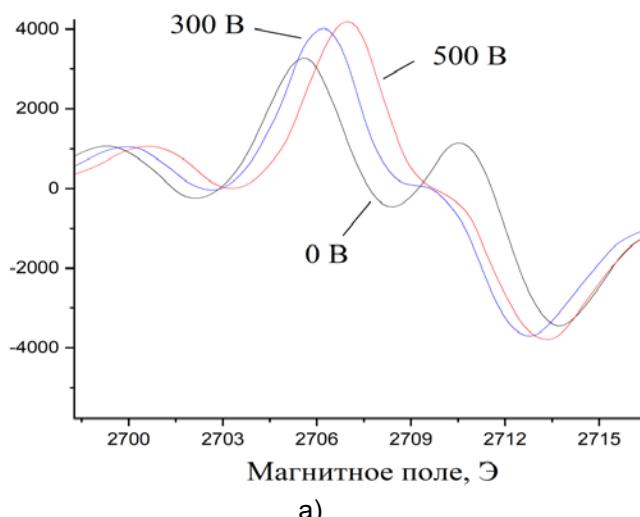


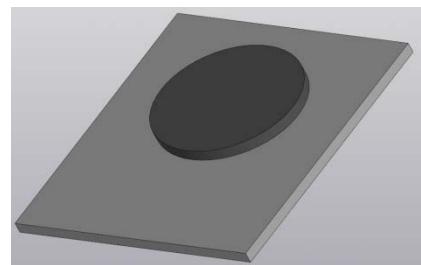
Рисунок 2. Стенд для исследований, спектрометр MS5000X и компьютер

Слоистые феррит-пьезоэлектрические структуры помещались в резонатор спектрометра. К пьезоэлектрической фазе слоистых структур прикладывалось электрическое поле с помощью источников питания.

В результате исследования получены зависимости сдвига линии ФМР от величины внешнего электрического поля,  $E=10$  кВ/см, представленные на рисунках 3-6.

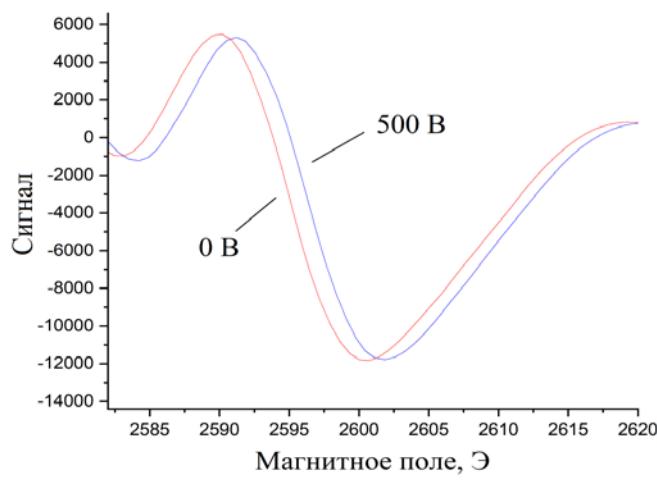


а)

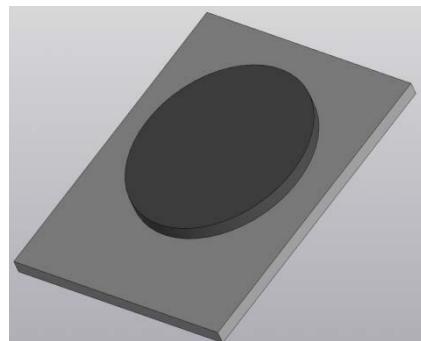


б)

Рисунок 3. Структура № 1: а) зависимость сдвига линии ФМР от величины внешнего электрического поля, б) структура ЖИГ-ГГГ ( $s=0,35$  мм;  $D=1,82$  мм) – ЦТС ( $5 \times 5 \times 0,5$  мм)

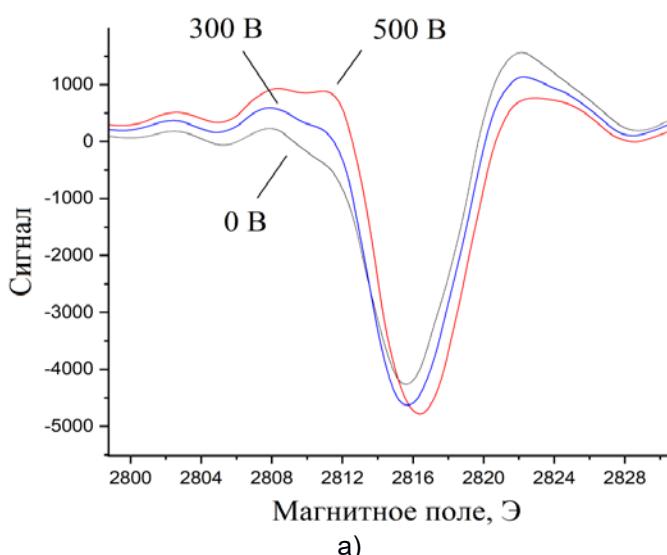


а)

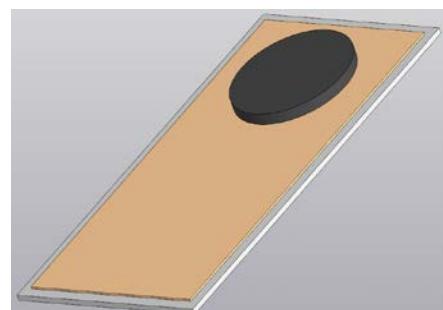


б)

Рисунок 4. Структура № 2: а) зависимость сдвига линии ФМР от величины внешнего электрического поля, б) структура ЖИГ-ГГГ ( $s=0,37$  мм;  $D=2,76$  мм) – ЦТС ( $5 \times 5 \times 0,5$  мм)



а)



б)

Рисунок 5. Структура № 3: а) зависимость сдвига линии ФМР от величины внешнего электрического поля, б) структура ЖИГ-ГГГ ( $s=0,35$  мм;  $D=1,82$  мм) – Лангасит ( $20 \times 5 \times 0,2$  мм)

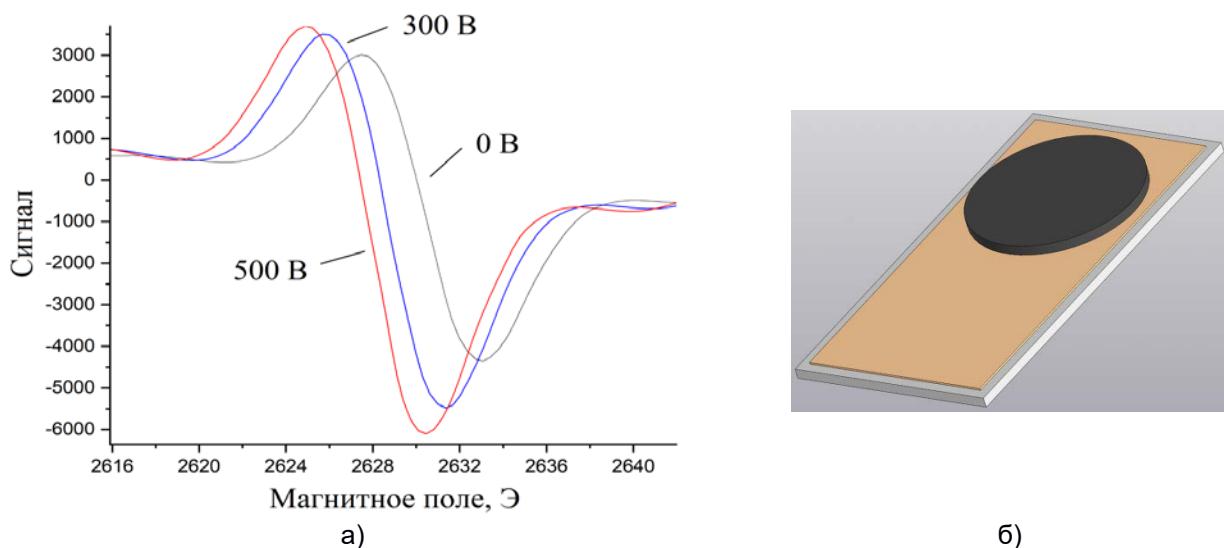


Рисунок 6. Структура № 4: а) зависимость сдвига линии ФМР от величины внешнего электрического поля, б) структура ЖИГ-ГГГ ( $s=0,37$  мм;  $D=2,76$  мм) – Лангасит ( $20 \times 5 \times 0,5$  мм)

Полученные результаты доказывают, что при приложении внешнего электрического поля наблюдается сдвиг линии ФМР. В структурах № 1, 2 и 4, соотношение толщин магнитострикционной и пьезоэлектрических фаз 1:1, наблюдается более выраженный сдвиг линии ФМР, по сравнению со структурой № 3, в которой соотношение толщин магнитострикционной и пьезоэлектрической фаз 2:1. В структурах № 1 и № 2, ЖИГ-ГГГ-ЦТС, пластины ЦТС поляризованы в направлении, перпендикулярном плоскости пластины, поэтому в них наблюдается линейный пьезоэлектрический эффект, в структуре №4, ЖИГ-ГГГ-Лангасит, пластины Лангасит Y-среза, в которых наблюдается квадратичный эффект за счет эффекта электрострикции, поэтому эффект сдвига незначительный. Значительный эффект сдвига будет наблюдаться, когда магнитное и электрическое поле приложены вдоль оси поляризации пьезоэлектрического слоя, совпадающего с осью магнитострикционного слоя, поэтому интересны структуры Лангасита с пластины X-среза.

Полученные результаты сдвигов линии ФМР от величины внешнего электрического поля можно использовать для выбора оптимального пьезоэлектрика для разработки новых управляемых СВЧ-устройств, принцип работы которых основан на электронной перестройке резонансных характеристик с помощью магнитного поля [5-11].

### Заключение

В статье представлены результаты исследования зависимостей сдвига линии ФМР в слоистых феррит-пьезоэлектрических структурах от параметров пьезоэлектриков. В качестве пьезоэлектриков были выбраны керамический сегнетоэлектрик ЦТС-19 и кристаллический пьезоэлектрик Лангасит. Структуры с соотношением толщин магнитострикционной и пьезоэлектрической фаз 1:1,

являются оптимальными, так как в них наблюдается наибольший сдвиг линии ФМР. В структуре № 4, ЖИГ-ГГГ-Лангасит наблюдается незначительный эффект сдвига из-за квадратичного эффекта, вызванного электрострикцией.

В дальнейшем планируется провести исследование слоистых структур, ЖИГ-ГГГ-Лангасит, X-среза, ЖИГ (моноокристалл)-Лангасит, X-среза и ЖИГ (моноокристалл)-ЦТС с соотношением толщин фаз 1:1, а также провести исследование сдвига линии ФМР в слоистых структурах с применением других пьезоэлектриков, ЖИГ-ГГГ-PMN-РТ и ЖИГ-ГГГ-Кварц.

### Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ, грант № 22-25-20224.

### Список литературы

1. Bichurin M. I., Petrov V. M., Petrov R. V., Tatarenko A. S. Magnetoelectric Composites. Singapore: Pan Stanford Publishing Pte. Ltd., 2019. 280 p.
2. Petrov V. M., Bichurin M. I., Saplev A. F., Tatarenko A. S., Lobekin V. N. Electric field induced broadening of magnetic resonance line in ferrite/piezoelectric bilayer // Journal of Applied Physics. 2017. 121(22). 224103. DOI: 10.1063/1.4985069
3. Лобекин В. Н., Снисаренко Д. В., Татаренко А. С., Бичурин М. И. Исследование магнитоэлектрического СВЧ вентиля на основе феррит-пьезоэлектрических структур // Вестник НовГУ. 2018. 1(107). 74-76.
4. Бичурин М. И., Петров В. М., Филиппов Д. А., Сринивасан Г. Магнитоэлектрический эффект в композиционных материалах. Великий Новгород: НовГУ им. Ярослава Мудрого, 2005. 226 с.
5. Хаванова М. А., Юхно И. М., Лобекин В. Н., Кузьмин Е. В., Петров Р. В. Исследование характеристик печатной антенны на основе магнитоэлектрических композитов // 28-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2018): материалы конференции, Севастополь, 09–15 сентября 2018 года. Т. 3. Севастополь: Севастопольский государственный университет, 2018. 646-651.
6. Лобекин В. Н., Бичурин М. И. Моделирование метаструктуры на основе сплит-кольцевых резонаторов с включением ферритовых элементов // Вестник НовГУ. 2022. 3(128). 91-95. DOI: 10.34680/2076-8052.2022.3(128).91-95
7. Лобекин В. Н., Кафаров Р. Г., Татаренко А. С., Муравьев В. Е. Исследование связи резонаторов микроволнового магнитоэлектрического полосового фильтра с помощью компьютерного моделирования // Вестник НовГУ. 2022. 3(128). 96-101. DOI: 10.34680/2076-8052.2022.3(128).96-101
8. Лаврентьева Д. В., Татаренко А. С. Магнитоэлектрический управляемый копланарный СВЧ вентиль-аттенюатор // Вестник НовГУ. 2014. 81. 55-58.
9. Татаренко А. С. Микрополосковая СВЧ антенна на композитной магнитоэлектрической подложке // Вестник НовГУ. 2013. 75(1). 37-39.
10. Татаренко А. С., Бичурин М. И., Филиппов А. В., Сринивасан Г. СВЧ фазовращатель на основе феррит-пьезоэлектрических композиционных материалов // Вестник НовГУ. 2004. 28. 156-158.
11. Татаренко А. С., Бичурин М. И., Сринивасан Г. Магнитоэлектрические фильтрующие СВЧ устройства // Вестник НовГУ. 2004. 26. 168-172.

### References

1. Bichurin M. I., Petrov V. M., Petrov R. V., Tatarenko A. S. Magnetoelectric Composites. Singapore, Pan Stanford Publishing Pte. Ltd., 2019. 280 p.

2. Petrov V. M., Bichurin M. I., Saplev A. F., Tatarenko A. S., Lobekin V. N. Electric field induced broadening of magnetic resonance line in ferrite/piezoelectric bilayer // *Journal of Applied Physics*. 2017. 121(22). 224103. DOI: 10.1063/1.4985069
3. Lobekin V. N., Snisarenko D. V., Tatarenko A. S., Bichurin M. I. Issledovanie magnitoelektricheskogo SVCh ventilia na osnove ferrit-p'ezoelektricheskikh struktur [Research of a magnetoelectric microwave isolator based on ferrite-piezoelectric structures] // *Vestnik NovSU*. 2018. 1(107). 74-76.
4. Bichurin M. I., Petrov V. M., Filippov D. A., Srinivasan G. Magnitoelektricheskii effekt v kompozitsionnykh materialakh [Magnetolectric effect in composite materials]. Veliky Novgorod, NovSU Publ., 2005. 226 p.
5. Khavanova M. A., Iukhno I. M., Lobekin V. N., Kuz'min E. V., Petrov R. V. Issledovanie kharakteristik pechatnoi antenny na osnove magnitoelektricheskikh kompozitov [Research of characteristics of patch antenna based on magnetolectric composites] // 28-ia Mezhdunarodnaia Krymskaia konferentsiia «SVCh-tehnika i telekommunikatsionnye tekhnologii» (KryMiKo'2018) [Proc.28 Int. Crimean Conf. "Microwave and telecommunication technology" (CriMiCo'2018)]. Sevastopol, Sevastopol State University Publ., 2018. 646-651.
6. Lobekin V. N., Bichurin M. I. Modelirovaniye metastruktury na osnove split-kol'tsevykh rezonatorov s vklucheniem ferritovykh elementov [Modeling of a metastructure based on split-ring resonators including the ferrite elements] // *Vestnik NovSU*. 2022. 3(128). 91-95. DOI: 10.34680/2076-8052.2022.3(128).91-95
7. Lobekin V. N., Kafarov R. G., Tatarenko A. S., Murav'ev V. E. Issledovanie sviazi rezonatorov mikrovolnovogo magnitoelektricheskogo polosovogo fil'tra s pomoshch'iu kom'juternogo modelirovaniia [Research of the coupling of resonators of a microwave magnetolectric band-pass filter using computer simulation] // *Vestnik NovSU*. 2022. 3(128). 96-101. DOI: 10.34680/2076-8052.2022.3(128).96-101
8. Lavrent'eva D. V., Tatarenko A. S. Magnitoelektricheskii upravliaemyi koplanarnyi SVCh ventil'-attenuator [Controlled magnetolectric coplanar microwave isolator-attenuator] // *Vestnik NovSU*. 2014. 81. 55-58.
9. Tatarenko A. S. Mikropoloskovaia SVCh antenna na kompozitnoi magnitoelektricheskoi podlozhke [A microwave microstrip antenna on a substrate of magnetolectric composite] // *Vestnik NovSU*. 2013. 75(1). 37-39.
10. Tatarenko A. S., Bichurin M. I., Filippov A. V., Srinivasan G. SVCh fazovrashchatel' na osnove ferrit-p'ezoelektricheskikh kompozitsionnykh materialov [SHF phaserotator on basis of ferrite-piezo-electric composite materials] // *Vestnik NovSU*. 2004. 28. 156-158.
11. Tatarenko A. S., Bichurin M. I., Srinivasan G. Magnitoelektricheskie fil'truiushchie SVCh ustroistva [The SHF magnetoelectric filter device] // *Vestnik NovSU*. 2004. 26. 168-172.

#### Информация об авторах

*Лобекин Вячеслав Николаевич* – инженер, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0000-0002-4896-2191, slavalobekin@gmail.com

*Бичурин Мирза Имамович* – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0000-0003-0650-4712, Mirza.Bichurin@novsu.ru

*Кафаров Руслан Гайдарович* – лаборант, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0009-0002-3707-1585, s247012@std.novsu.ru

*Петров Роман Валерьевич* – доктор физико-математических наук, доцент, профессор, главный научный сотрудник, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0000-0002-9751-116X, Roman.Petrov@novsu.ru