

РАДИОФИЗИКА

УДК 621.372:615.849.112

DOI: 10.34680/2076-8052.2023.1(130).178-185

ГРНТИ 29.19.37

Специальность ВАК 1.3.4

Научная статья

МИКРОВОЛНОВЫЙ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В ФЕРРИТ-ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ ЖИГ-ГГГ-ЦТС И ЖИГ-ГГГ-PMN-PT

Лобекин В. Н., Кафаров Р. Г., Бичурин М. И., Соколов О. В., Иванов С. В.

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

Аннотация В данной работе исследован микроволновый магнитоэлектрический эффект в слоистых феррит-пьезоэлектрических структурах ЖИГ-ГГГ-ЦТС и ЖИГ-ГГГ-PMN-PT в СВЧ диапазоне. Активное развитие современной СВЧ-техники приводит к исследованию новых материалов, обладающих различными физическими свойствами, а также созданию новых слоистых структур из этих материалов, которые можно комбинировать: магнитные и сегнетоэлектрические, магнитные и полупроводниковые и т.д.. В результате проведенного экспериментального исследования получены зависимости микроволнового магнитоэлектрического эффекта, проявляющегося в сдвиге линии ферромагнитного резонанса, в феррит-пьезоэлектрических структурах ЖИГ-ГГГ-ЦТС и ЖИГ-ГГГ-PMN-PT. На основе полученных данных экспериментального исследования можно сделать вывод, что эффект сдвига линии ферромагнитного резонанса можно использовать для разработки нового поколения управляемых устройств СВЧ твердотельной электроники, таких как вентили, аттенуаторы, циркуляторы, фазовращатели, фильтры и др.

Ключевые слова: микроволновый магнитоэлектрический эффект, сдвиг резонансной линии, ферромагнитный резонанс, железо-иттриевый гранат

Для цитирования: Лобекин В. Н., Кафаров Р. Г., Бичурин М. И., Соколов О. В., Иванов С. В. Микроволновый магнитоэлектрический эффект в феррит-пьезоэлектрических структурах ЖИГ-ГГГ-ЦТС и ЖИГ-ГГГ-PMN-PT // Вестник НовГУ. 2023. 1(130). 178-185. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.1(130).178-185

Research Article

MICROWAVE MAGNETOELECTRIC EFFECT IN FERRITE-PIEZOELECTRIC STRUCTURES YIG-GGG-PZT AND YIG-GGG-PMN-PT

Lobekin V. N., Kafarov R. G., Bichurin M. I., Sokolov O. V., Ivanov S. V.

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

Abstract In this work, the microwave magnetoelectric effect in the layered ferrite-piezoelectric structures YIG-GGG-PZT and YIG-GGG-PMN-PT in the microwave range is studied. The active development of modern microwave technology leads to the study of new materials with different physical properties, as well as to the creation of new layered structures from these materials, which can be combined: magnetic and ferroelectric, magnetic and semiconductor, etc. As a result of the experimental study, the dependences of the microwave magnetoelectric effect, which manifests itself in the ferromagnetic resonance line shift, in the YIG-GGG-PZT and YIG-GGG-PMN-PT ferrite-piezoelectric structures were obtained. Based on the data obtained from the experimental study, it can be concluded that the effect of ferromagnetic resonance line shift can be used to develop a new generation of controllable microwave solid-state electronics devices, such as isolators, attenuators, circulators, phase shifters, filters, etc.

Keywords: microwave magnetoelectric effect, resonance line shift, ferromagnetic resonance, yttrium iron garnet

For citation: Lobekin V. N., Kafarov R. G., Bichurin M. I., Sokolov O. V., Ivanov S. V. Microwave magnetoelectric effect in ferrite-piezoelectric structures YIG-GGG-PZT and YIG-GGG-PMN-PT // Vestnik NovSU. 2023. 1(130). 178-185. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.1(130).178-185.

Введение

Магнитоэлектрический (МЭ) микроволновый эффект в сверхвысокочастотном (СВЧ) диапазоне в слоистых структурах на основе ферро- и ферритмагнетиков, реализуется приложением электрического поля к пьезоэлектрической фазе, вследствие чего происходит обусловленный магнитоупругим эффектом, сдвиг или уширение линии ферромагнитного резонанса (ФМР). Исследованию МЭ эффекта в слоистых структурах посвящено большое количество работ. Теория описывает процессы, происходящие в структурах [1-3], эксперименты представлены в работах [4-6]. Другая часть работ посвящена практическому применению [7-10].

Ранее было проведено исследование зависимости сдвига линии ФМР от параметров пьезоэлектриков в слоистых структурах на основе железо-иттриевого граната (ЖИГ) на подложке гадолиний-галлиевого граната (ГГГ) от величины внешнего электрического поля и параметров различных пьезоэлектриков (цирконат-титанат свинца (ЦТС), Лангасит). Полученные результаты доказали, что при приложении внешнего электрического поля к пьезоэлектрической фазе, в магнитострикционной фазе наблюдается сдвиг линии ФМР, а выбор материала влияет на величину сдвига, что позволяет использовать оптимальный материал для пьезоэлектрической фазы с целью разработки управляемых СВЧ-устройств, принцип работы которых будет основан на перестройке резонансных характеристик с помощью электрического поля.

В данной работе было проведено исследование микроволнового МЭ эффекта в структуре ЖИГ-ГГГ-PMN-PT и ЖИГ-ГГГ-ЦТС, а также проведен сравнительный анализ полученных экспериментальных данных.

Слоистые феррит-пьезоэлектрические структуры ЖИГ-ГГГ-ЦТС и ЖИГ-ГГГ-PMN-PT

Исследуемые слоистые структуры состояли из магнитострикционной фазы (феррит ЖИГ на подложке ГГГ) и пьезоэлектрической фазы – пьезокерамика ЦТС-19 и монокристаллический пьезоэлектрик PMN-PT представлены на рисунке 1.

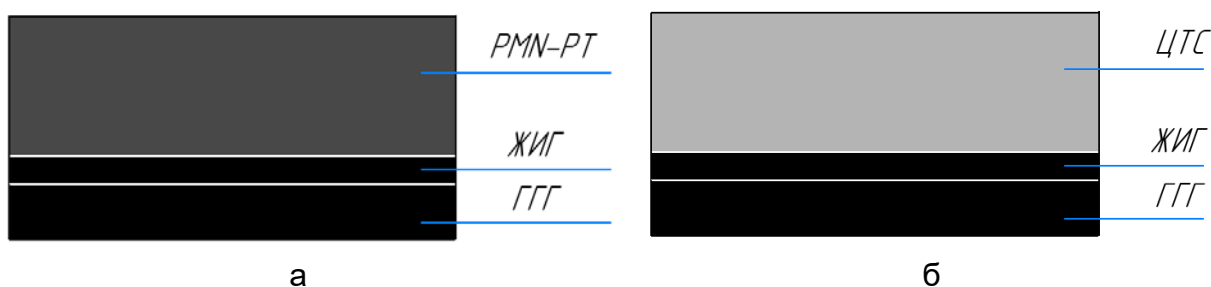


Рисунок 1. Слоистые феррит-пьезоэлектрические структуры: а – структура ЖИГ-ГГГ-PMN-PT; б – структура ЖИГ-ГГГ-ЦТС.

Слоистая феррит-пьезоэлектрическая структура №1, ЖИГ-ГГГ-PMN-PT (рисунок 1 а) имеет следующие размеры: магнитострикционная фаза – плёнка ЖИГ в форме диска, диаметр, $D=2,845$ мм, толщина, $s=0,005$ мм, нанесённая с помощью эпитаксии на подложку ГГГ в форме диска, диаметр, $D=2,845$ мм, толщина, $s=0,357$ мм,

при чём с одной стороны подложки ГГГ один слой плёнки ЖИГ снят с помощью шлифовки и полировки, формируя общую толщину магнитострикционной фазы, $s=0,362$ мм; пьезоэлектрическая фаза – монокристаллическая пластина PMN-PT, размеры $10 \times 3 \times 0,5$ мм. Диск ЖИГ-ГГГ расположен по центру пластины PMN-PT. Слои соединены между собой с помощью токопроводящего клея «Контактол-А Keller» на серебре. На рисунке 2 представлена структура ЖИГ-ГГГ в микроскопе, стороной ГГГ вверх.

Слоистая феррит-пьезоэлектрическая структура № 2, ЖИГ-ГГГ-ЦТС (рисунок 1 б) имеет следующие размеры: магнитострикционная фаза – тот же диск ЖИГ, что и в структуре № 1; пьезоэлектрическая фаза – пьезокерамическая пластина ЦТС-19, размеры $5 \times 5 \times 0,5$ мм. Диск ЖИГ-ГГГ расположен по центру пластины ЦТС-19. Слои соединены между собой с помощью токопроводящего клея «Контактол-А Keller».



Рисунок 2. Структура ЖИГ-ГГГ в микроскопе «Микромед 3 вар. 3-20»

К магнитострикционной фазе слоистых феррит-пьезоэлектрических структур прикладывалось постоянное магнитное поле H_0 , направленное перпендикулярно плоскости образца (рисунок 3). Благодаря этому в магнитострикционной фазе наблюдался ФМР на резонансной частоте. За счёт приложения постоянного электрического поля к пьезоэлектрической фазе слоистой структуры, в ней образуется деформация, которая передаётся на магнитострикционную фазу, формируя сдвиг линии ФМР за счёт магнитоупругого эффекта.

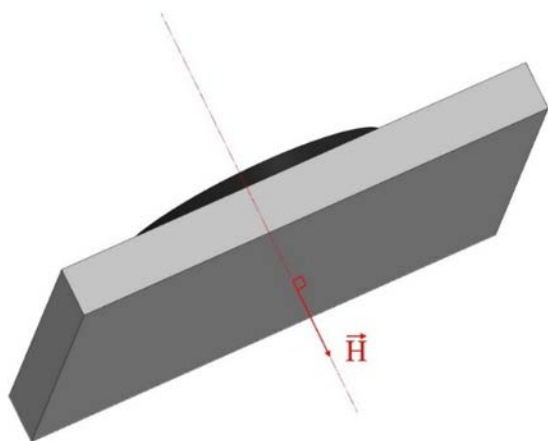


Рисунок 3. 3-D модель слоистой феррит-пьезоэлектрической структуры ЖИГ-ГГГ-PMN-PT/ЦТС с направлением приложенного постоянного магнитного поля H_0

Исследование микроволнового МЭ эффекта в слоистых феррит-пьезоэлектрических структурах ЖИГ-ГГГ-PMN-РТ и ЖИГ-ГГГ-ЦТС

Исследование проводилось на измерительном стенде, представленном на рисунке 4, состоящем из спектрометра «Magnettech MiniScope MS-5000X» (Германия) и ПК, с установленным программным обеспечением для работы со спектрометром.

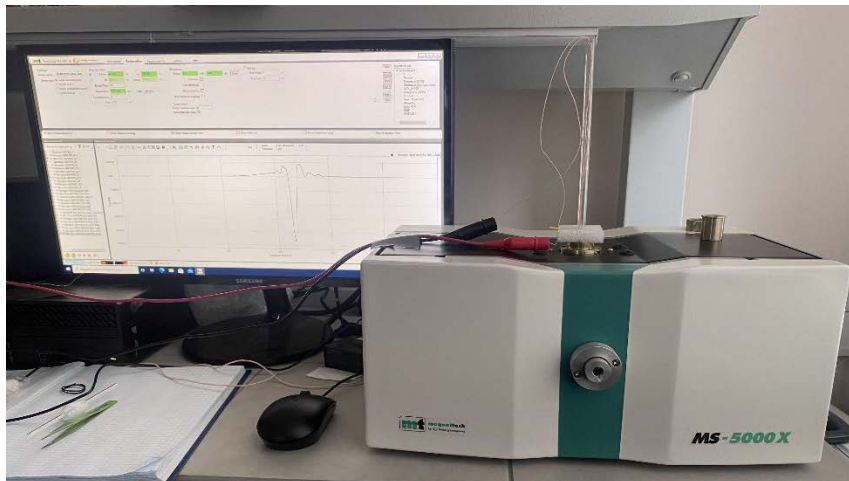


Рисунок 4. Стенд для экспериментальных исследований

Слоистые феррит-пьезоэлектрические структуры № 1 (ЖИГ-ГГГ-PMN-РТ) и № 2 (ЖИГ-ГГГ-ЦТС), помещались в резонатор спектрометра. С помощью источника питания «GW Instek GPR-750H15D» 500 В (Тайвань) к пьезоэлектрической фазе структур прикладывалось электрическое поле, напряжённостью от 1 до 10 кВ/см.

В результате экспериментального исследования получены зависимости сдвигов линии ФМР от напряжённости электрического поля в слоистых структурах № 1 и № 2, представленные на рисунках 5 и 6.

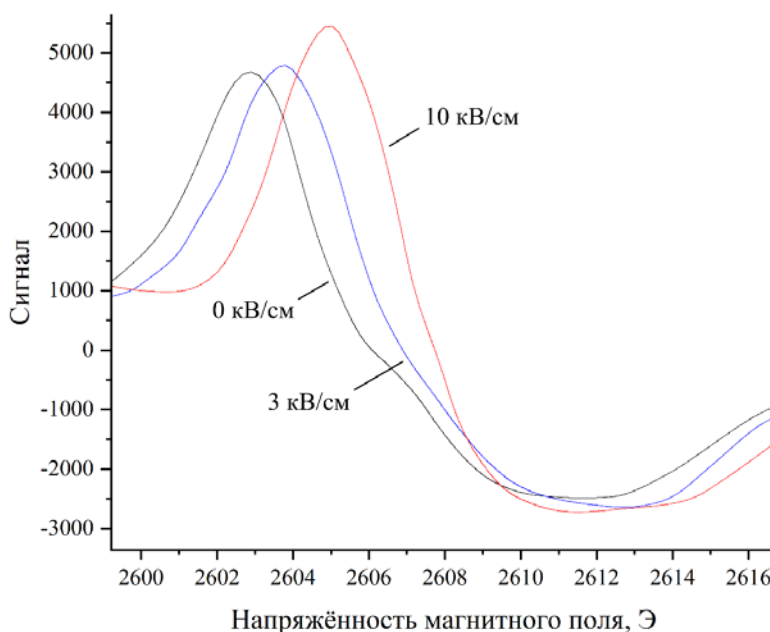


Рисунок 5. Зависимость сдвига линии ФМР от напряжённости электрического пол для структуры №1, ЖИГ-ГГГ-PMN-РТ

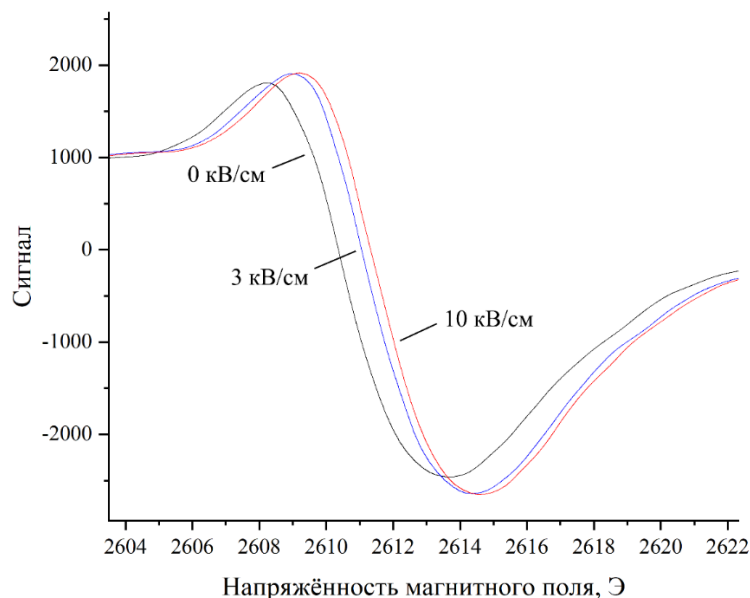


Рисунок 6. Зависимость сдвига линии ФМР от напряжённости электрического пол для структуры №2, ЖИГ-ГГГ-ЦТС

Результаты, представленные на рисунках 5 и 6 показывают, что при приложении внешнего электрического поля к пьезоэлектрической фазе слоистых феррит-пьезоэлектрических структур, наблюдается микроволновый МЭ эффект, заключающийся в сдвиге линии ФМР. В структуре № 1, ЖИГ-ГГГ-PMN-PT, величина сдвига составила 2,14 Э, для структуры № 2, ЖИГ-ГГГ-ЦТС, сдвиг составил 0,9 Э, что в 2,4 раза меньше, чем в структуре № 1, ЖИГ-ГГГ-PMN-PT. Обусловлено это тем, что монокристаллический пьезоэлектрик PMN-PT обладает лучшими пьезоэлектрическими свойствами, чем пьезокерамика ЦТС-19. Также важным является то, что магнитное и электрическое поля приложены вдоль оси поляризации пьезоэлектрического слоя, совпадающего с осью [111] магнитострикционного слоя.

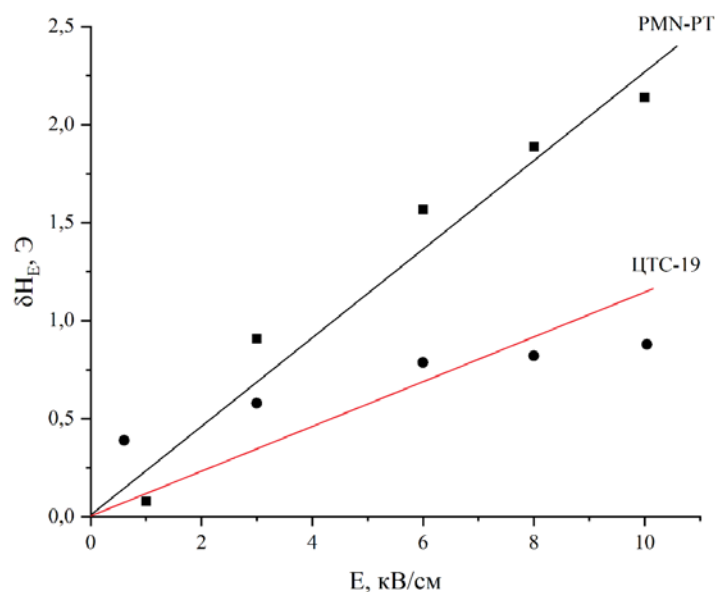


Рисунок 7. Линейная зависимость МЭ эффекта для определения констант А

Также были получены первичные теоретические оценки, которые показали, что сдвиг резонансного значения подмагничивающего поля прямо пропорционален напряжённости приложенного к пьезоэлектрику электрического поля $\delta H_E = AE$. Величина константы A находится из рисунка 7 и для слоистой феррит-пьезоэлектрической структуры ЖИГ-ГГГ-PMN-PT составила 0,213 Э/кВ/см, для структуры ЖИГ-ГГГ-ЦТС, 0,09 Э/кВ/см. Точный количественный расчёт внутренней структуры постоянной A затруднён специфической формой МЭ образца, состоящего из прямоугольного параллелепипеда пьезоэлектрика и диска ЖИГ/ГГГ. Работа над этим расчётом будет продолжена, и результаты будут представлены в следующих публикациях.

Полученные результаты сдвигов линии ФМР от величины внешнего электрического поля позволяют подобрать оптимальный пьезоэлектрик для структур новых управляемых СВЧ-устройств, принцип работы которых будет основан на перестройке резонансных характеристик с помощью электрического поля.

Заключение

В статье представлены результаты экспериментального исследования микроволнового МЭ эффекта в слоистых феррит-пьезоэлектрических структурах ЖИГ-ГГГ-PMN-PT и ЖИГ-ГГГ-ЦТС. Для слоистой структуры ЖИГ-ГГГ-PMN-PT найденная МЭ константа A равна 0,213 Э/кВ/см, что в 2,4 раза больше, чем для структуры ЖИГ-ГГГ-ЦТС. Полученные данные величин МЭ констант A позволяют подобрать оптимальные параметры и размеры слоистых феррит-пьезоэлектрических структур для разработки СВЧ-устройств, принцип работы которых основан на микроволновом МЭ эффекте. Кроме того, планируется провести дополнительные теоретические расчёты угловых зависимостей сдвигов линии ФМР в данных феррит-пьезоэлектрических структурах и сравнить результаты с результатами, полученными в ходе экспериментального исследования.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ, грант № 22-29-00950.

Список литературы

1. Соколов О. В., Бичурин М. И., Лобекин В. Н., Татаренко А. С. Микроволновый магнитоэлектрический эффект в двухслойных структурах на основе железо-иттриевого граната, кварца и магнониобата свинца // Вестник НовГУ. 2019. 4(116). 92-95. DOI: 10.34680/2076-8052.2019.4(116).92-95
2. Bichurin M. I., Sokolov O. V., Tatarenko A. S., Lobekin V. N., Leontiev V. S., Turutina A. V. Microwave Magnetoelectric Effect in a Two-Layer FeGaB/PZN-PT Structure // Microwave Conference (RMC): Proceedings of the 7th All-Russian Microwave Conference, Moscow, November 25–27, 2020. Moscow, 2020. P. 282-285. DOI: 10.1109/RMC50626.2020.9312260
3. Маничева И. Н., Филиппов Д. А., Лалетин В. М. Магнитоэлектрический эффект втрехслойной структуре никель-кварц-никель // Международный научно-исследовательский журнал. 2019. 4(82), часть 1. 27-32. DOI: 10.23670/IRJ.2019.82.4.005
4. Вьюник Д. А., Капустин В. Г., Савельев Д. В., Фетисов Л. Ю., Чашин Д. В.,

Шабин П. А. Магнитоэлектрический эффект в слоистой структуре пьезоэлектрик-магнитострикционный волоконный композит // Ломоносов-2019 : материалы XXVI международного молодежного научного форума, Москва, 08–12 апреля 2019 года. Москва, 2019. С. 759-761. URL: https://conf.msu.ru/archive/Lomonosov_2019/data/section_33_16302.htm (Дата обращения: 14.01.2023).

5. 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.

6. Bichurin M. I., Sokolov O. V., Leontiev V. S., Petrov R. V., Tatarenko A. S., Semenov G. A., Ivanov S. N., Turutin A. V., Kubasov I. V., Kislyuk A. M., Malinkovich M. D., Parkhomenko Y. N., Kholkin A. L., Sobolev N. A. Magnetoelectric Effect in the Bidomain Lithium Niobate/NiCe / Metglas Gradient Structure // Physica Status Solidi (B) Basic Research. 2020. 257(3). 1900398. DOI: 10.1002/pssb.201900398

7. Леонтьев В. С., Петров Р. В., Божков С. Т. Исследование датчика положения коленчатого вала на основе композитной структуры LiNbO₃ // Вестник НовГУ. 2020. 2(118). 36-39. DOI: 10.34680/2076-8052.2020.2(118).36-39

8. Петров В. М., Сергеев И. С. Гиратор в источниках вторичного электропитания // Вестник НовГУ. 2018. 4(110). 19-24.

9. Bichurin M. I., Petrov V. M., Petrov R. V., Kapralov G. N., Kiliba Yu. V., Bukashev F. I., Smirnov A. Yu., Tatarenko A. S. Magnetoelectric microwave devices // Ferroelectrics. 2011. 280(1). 211-218. DOI: 10.1080/00150190214807

10. Петров Р. В., Леонтьев В. С. Магнитоэлектрический магнитометр // Вестник НовГУ. 2013. 75, т.1. 29-32.

References

1. Sokolov O. V., Bichurin M. I., Lobekin V. N., Tatarenko A. S. Mikrovolnovyy magnitoelektricheskiy effekt v dvukhsloynnykh strukturakh na osnove zhelezo-ittriyevoogo granata, kvartsa i magnoniobata svintsa [Microwave magnetoelectric effect in two-layer structures based on yttrium iron garnet, quartz and lead magnoniobate] // Vestnik NovSU. 2019. 4(116). 92-95. DOI: 10.34680/2076-8052.2019.4(116).92-95

2. Bichurin M. I., Sokolov O. V., Tatarenko A. S., Lobekin V. N., Leontiev V. S., Turutin A. V. Microwave Magnetoelectric Effect in a Two-Layer FeGaB/PZN-PT Structure // Microwave Conference (RMC): Proceedings of the 7th All-Russian Microwave Conference, Moscow, November 25–27, 2020. Moscow, 2020. P. 282-285. DOI: 10.1109/RMC50626.2020.9312260

3. Manicheva I. N., Filippov D. A., Laletin V. M. Magnitoelektricheskiy effekt vtrekhsloynnoy strukture nikel'-kvarts-nikel' [Magnetoelectric effect in a nickel-quartz-nickel three-layer structure] // International Research Journal. 2019. 4(82), part 1. 27-32. DOI: 10.23670/IRJ.2019.82.4.005

4. Vyunik D. A., Kapustin V. G., Saveliev D. V., Fetisov L. Yu., Chashin D. V., Shabin P. A. Magnitoelektricheskiy effekt v sloistoy strukture p'yezoelektrik-magnitostriksionnyy volokonnyy kompozit [Magnetoelectric effect in a layered structure of a piezoelectric-magnetostrictive fiber composite] // Lomonosov-2019: Materials of the XXVI International Youth Scientific Forum, Moscow, April 08–12, 2019. Moscow, 2019. P. 759-761. Available at: https://conf.msu.ru/archive/Lomonosov_2019/data/section_33_16302.htm (Accessed: 14.01.2023).

5. Lobekin V. N., Snisarenko D. V., Tatarenko A. S., Bichurin M. I. Issledovaniye magnitoelektricheskogo SVCH ventilya na osnove ferrit-p'yezoelektricheskikh struktur [Study of a magnetoelectric microwave valve based on ferrite-piezoelectric structures]. Vestnik NovSU. 2018. 1(107). 74-76.

6. Bichurin M. I., Sokolov O. V., Leontiev V. S., Petrov R. V., Tatarenko A. S., Semenov G. A., Ivanov S. N., Turutin A. V., Kubasov I. V., Kislyuk A. M., Malinkovich M. D., Parkhomenko Y. N., Kholkin A. L., Sobolev N. A. Magnetoelectric Effect in the Bidomain Lithium Niobate/Nicke / Metglas Gradient Structure // Physica Status Solidi (B) Basic Research. 2020. 257(3). 1900398. DOI: 10.1002/pssb.201900398

7. Leontiev V. S., Petrov R. V., Bozhkov S. T. Issledovaniye datchika polozheniya kolenchatogo vala na osnove kompozitnoy struktury LiNbO₃ [Study of the crankshaft position sensor based on the LiNbO₃ composite structure] // Vestnik NovSU. 2020. 2(118). 36-39. DOI: 10.34680/2076-8052.2020.2(118).36-39

8. Petrov V. M., Sergeev I. S. Girator v istochnikakh vtorichnogo elektropitaniya [Gyrator in secondary power sources] // Vestnik NovSU. 2018. 4(110). 19-24.

9. Bichurin M. I., Petrov V. M., Petrov R. V., Kapralov G. N., Kiliba Yu. V., Bukashev F. I., Smirnov A. Yu., Tatarenko A. S. Magnetoelectric microwave devices // Ferroelectrics. 2011. 280(1). 211-218. DOI: 10.1080/00150190214807

10. Petrov R. V., Leontiev V. S. Magnitoelektricheskiy magnitometr [Magnetoelectric magnetometer] // Vestnik NovSU. 2013. 75, vol. 1. 29-32.

Информация об авторах

Лобекин Вячеслав Николаевич – инженер, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0000-0002-4896-2191, s203878@std.novsu.ru

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

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

Соколов Олег Владимирович – кандидат физико-математических наук, инженер-исследователь, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0000-0002-3041-9537, Oleg.Sokolov@novsu.ru

Иванов Сергей Вадимович – лаборант, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0009-0003-8581-9575, s243962@std.novsu.ru