

РАДИОФИЗИКА

УДК 53.098:537.8

DOI: 10.34680/2076-8052.2024.3(137).341-350

Поступила в редакцию / Received 12.08.2024

ГРНТИ 29.10.01+29.19.37

Специальность ВАК 1.3.4

Принята к публикации / Accepted 19.09.2024

Научная статья

ВЛИЯНИЕ ЧИСЛА МАГНИТОСТРИКЦИОННЫХ ВОЛОКОН НА МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В СТРУКТУРЕ ЦТС-19 / АМАГ-225

Ивашева Е. Е., Леонтьев В. С., Осипова И. С., Бичурин М. И.

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

Аннотация В статье представлено экспериментальное исследование магнитоэлектрического эффекта в трех композитных структурах, где в качестве пьезоэлектрической фазы использовалась пластина ЦТС-19, а в качестве магнитострикционной фазы – пластина из аморфного магнитомягкого сплава АМАГ-225, 4 волокна АМАГ-225 и 5 волокон АМАГ-225. Приведены графики зависимости выходного напряжения от частоты и магнитоэлектрического коэффициента от частоты для изготовленных композитов. В структуре с использованием магнитострикционной пластины магнитоэлектрический коэффициент составил 12,99 В/(см·Э), с использованием 4 магнитострикционных волокон – 5,41 В/(см·Э), с использованием 5 магнитострикционных волокон – 20,36 В/(см·Э). Было получено, что с использованием большего числа волокон АМАГ-225 наблюдается увеличение магнитоэлектрического эффекта по сравнению со структурами, где используется 4 волокна или пластина АМАГ-225.

Ключевые слова: *магнитофибер, магнитоэлектрическая структура, магнитоэлектрический эффект, магнитострикционные волокна, пьезоэлектрическая пластина*

Для цитирования: Ивашева Е. Е., Леонтьев В. С., Осипова И. С., Бичурин М. И. Влияние числа магнитострикционных волокон на магнитоэлектрический эффект в структуре ЦТС-19 / АМАГ-225 // Вестник НовГУ. 2024. 3 (137). 341-350. DOI: 10.34680/2076-8052.2024.3(137).341-350

Research Article

INFLUENCE OF THE NUMBER OF MAGNETOSTRICTIVE FIBERS ON THE MAGNETOELECTRIC EFFECT IN THE STRUCTURE OF PZT-19 / AMAG-225

Ivasheva E. E., Leontiev V. S., Osipova I. S., Bichurin M. I.

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

Abstract The article presents an experimental study of the magnetoelectric effect in three composite structures, where a PZT-19 plate was used as the piezoelectric phase, and a plate of amorphous soft magnetic alloy AMAG-225, 4 AMAG-225 fibers and 5 AMAG-225 fibers were used as the magnetostrictive phase. The graphs of the dependence of the output voltage on the frequency and the magnetoelectric coefficient on the frequency for the manufactured composites are given. In the structure using a magnetostrictive plate, the magnetoelectric coefficient was 12,99 V/(cm·Oe), with the use of 4 magnetostrictive fibers – 5,41 V/(cm·Oe), with the use of 5 magnetostrictive fibers – 20,36 V/(cm·Oe). It was found that with the use of a larger number of AMAG-225 fibers, an increase in the magnetoelectric effect is observed compared to the structures where 4 fibers or an AMAG-225 plate are used.

Keywords: *magnetofiber, magnetoelectric structure, magnetoelectric effect, magnetostrictive fibers, piezoelectric plate*

For citation: Ivasheva E. E., Leontiev V. S., Osipova I. S., Bichurin M. I. Influence of the number of magnetostrictive fibers on the magnetoelectric effect in the structure of PZT-19 / AMAG-225 // Vestnik NovSU. 2024. 3 (137). 341-350. DOI: 10.34680/2076-8052.2024.3(137).341-350

Введение

В композитных структурах, в которых механически связаны между собой магнитострикционные и пьезоэлектрические компоненты, возникает магнитоэлектрический (МЭ) эффект. Прямой МЭ эффект заключается в изменении электрических свойств структуры под действием внешнего магнитного поля, обратный МЭ эффект проявляется, наоборот, в изменении магнитных свойств композита под действием внешнего электрического поля.

Одним из развивающихся направлений в области магнитоэлектроники на данный момент является разработка и исследование МЭ структур на основе магнитострикционных и пьезоэлектрических волокон [1, 2]. В настоящее время проведено большое количество исследований, посвященных слоистым МЭ композитам на основе гибкой пьезоэлектрической волокнистой структуры – пьезофибера, – в которых наблюдается значительный МЭ эффект [3]. Изучение магнитострикционных волокнистых структур [4, 5] находится на начальной стадии, что открывает большие перспективы для проведения различных теоретических и экспериментальных исследований, в том числе, связанных с МЭ эффектом.

Исследование МЭ эффекта является перспективным направлением и МЭ структуры находят применение в различного рода устройствах, например, в датчиках магнитного поля [6, 7], датчиках электрического тока [8, 9], исполнительных механизмах (актюаторах) [10, 11], системах сбора энергии (харвестерах) [12, 13] благодаря их способности преобразовывать магнитные и электрические сигналы. За счет повышенной восприимчивости к магнитным полям МЭ структуры применяются в устройствах, где требуются высокоточные измерения.

Технология изготовления

Для экспериментального исследования МЭ структуры на основе пьезоэлектрической пластины и магнитострикционных волокон был изготовлен несимметричный МЭ композит на основе пластины пьезоэлектрика ЦТС-19 с размерами 30×10×0,5 мм и магнитострикционных волокон из аморфного сплава марки АМАГ-225, каждое волокно которого имело размеры 28×2×0,021 мм. Были изготовлены образцы с использованием 4 и 5 волокон АМАГ-225. Также для сравнения полученных результатов была изготовлена структура с пьезоэлектрической пластиной ЦТС-19 того же размера и магнитострикционной пластиной из сплава АМАГ-225 с размерами 28×10×0,021 мм. Для обеспечения жесткой механической связи в каждом случае магнитострикционная фаза соединялась при помощи клея БФ-2 с пластиной пьезоэлектрика. Далее, образцы сушились при комнатной температуре в течение 24 часов под давлением 300 Па. После высыхания клея производилась пайка выводов непосредственно к пьезоэлектрической пластине ЦТС-19.

На рисунке 1 приведены изготовленные несимметричные МЭ структуры на основе пластины ЦТС-19 и магнитомягкого аморфного сплава марки АМАГ-225, где под 1 и 2 обозначены структуры с использованием 4 и 5 волокон АМАГ-225, имеющих размеры $28 \times 2 \times 0,021$ мм, соответственно, и под 3 показана структура с использованием пластины из аморфного сплава, которая имела размеры $28 \times 10 \times 0,021$ мм. При этом расстояние между магнитострикционными волокнами в первом композите составляло от 0,41 мм до 0,76 мм, а во втором – от 0,04 мм до 0,35 мм.

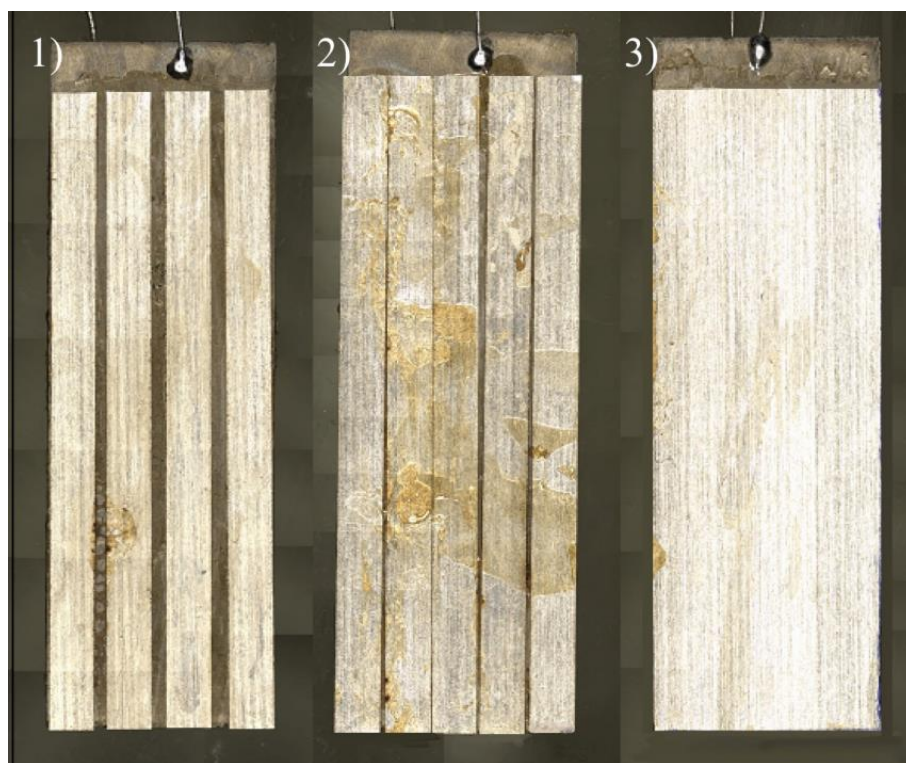


Рисунок 1. МЭ структуры ЦТС-19 / АМАГ-225 с использованием: 1) 4 магнитострикционных волокон, 2) 5 магнитострикционных волокон, 3) магнитострикционной пластины

Экспериментальная установка

Для измерения характеристик изготовленных МЭ структур использовалась экспериментальная установка, включающая в себя следующее оборудование: AC&DC катушки Гельмгольца DXHC5-300; генератор сигналов RIGOL DG2052; усилитель мощности DXFVC-60; источник постоянного тока Tonghui TH6323; магнитометр DEXINGMAG DX-180 и осциллограф RIGOL DHO1072.

На рисунке 2 представлена установка, с помощью которой проводились экспериментальные исследования МЭ образцов.

Экспериментальная установка работает следующим образом: внутри катушек Гельмгольца создается область с однородным постоянным и переменным магнитными полями, при этом напряженность переменного магнитного поля устанавливается равной 1 Э. Для создания такой области используются генератор переменного сигнала и источник постоянного тока. Усилитель сигналов необходим

для передачи сигнала с генератора на катушку Гельмгольца. МЭ образец помещается внутрь катушки Гельмгольца. Выводы МЭ образца подключаются к осциллографу, с помощью которого детектируется выходное напряжение U . С помощью магнитометра проводилось измерение напряженности постоянного и переменного магнитных полей в катушке.

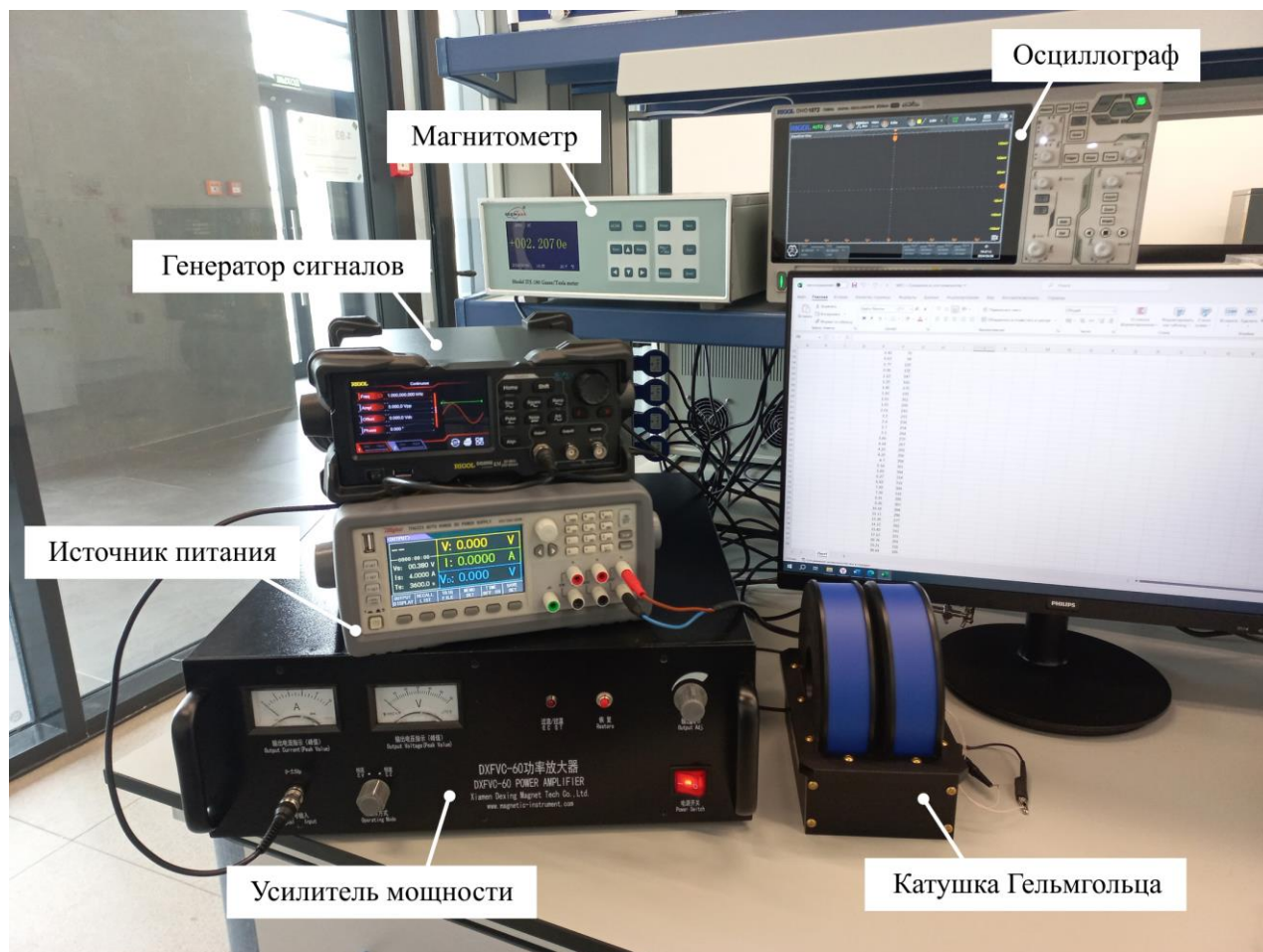


Рисунок 2. Экспериментальная установка

Результаты эксперимента

В ходе проведения экспериментальных исследований изготовленных магнитострикционно-пьезоэлектрических структур, изображенных на рисунке 1, с помощью оборудования, представленного на рисунке 2, были получены зависимости выходного напряжения МЭ образцов U от частоты f .

На рисунке 3 представлена зависимость выходного напряжения от частоты для исследуемых МЭ структур на основе пьезокерамики ЦТС-19 и аморфного сплава АМАГ-225 с 4 и 5 магнитострикционными волокнами, а также с использованием пластины из АМАГ-225.

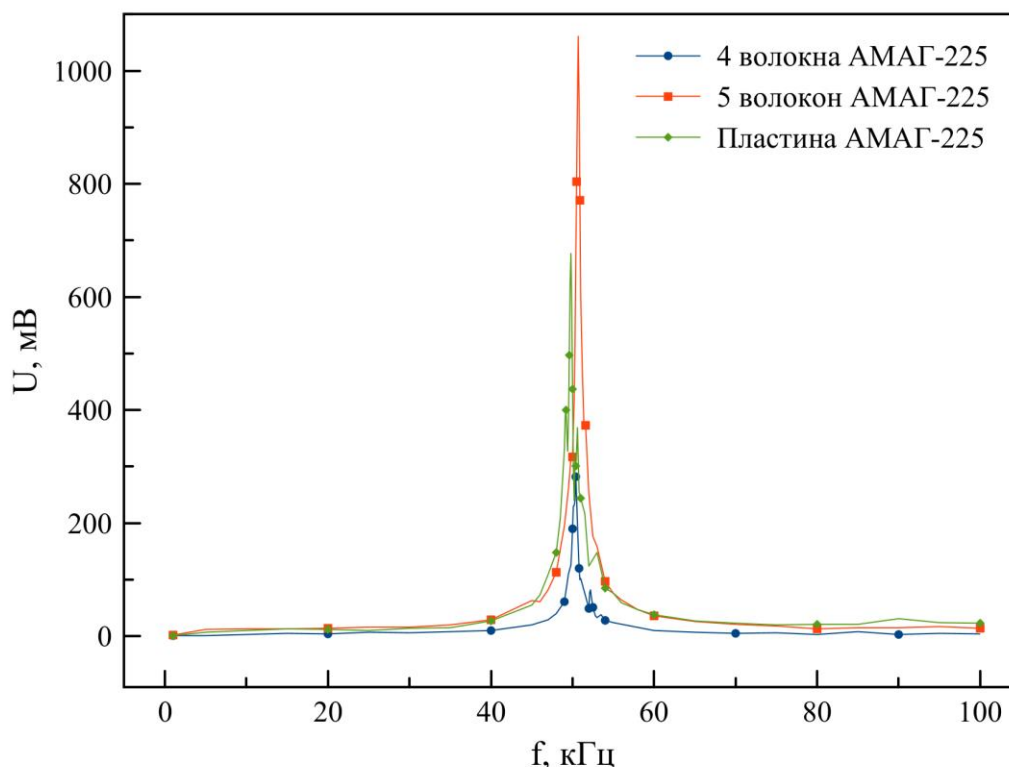


Рисунок 3. График зависимости выходного напряжения от частоты для МЭ образцов ЦТС-19 / АМАГ-225: синяя линия – с использованием 4 волокон АМАГ-225, оранжевая линия – с использованием 5 волокон АМАГ-225, зеленая линия – с использованием пластины АМАГ-225

Зависимость МЭ коэффициента от частоты можно получить, используя следующую формулу:

$$\alpha = - \frac{{}^m\nu {}^p\nu {}^mY^B q_{11} d_{31} {}^p s_{11} \tan(\eta)}{\varepsilon_{33} \varepsilon_0 {}^p s_{11}^2 c_{11} \eta + d_{31}^2 \left[{}^p\nu \tan(\eta) - c_{11} {}^p s_{11} \eta \right]} \quad (1)$$

где ${}^m\nu$ – объемная доля магнестрикционной фазы; ${}^p\nu$ – объемная доля пьезоэлектрической фазы; ${}^mY^B = \frac{{}^mY}{1 - {}^mK_{11}^2}$; mY – модуль Юнга; ${}^mK_{11}^2 = \frac{{}^mY q_{11}^2}{\mu \mu_0}$ – квадрат коэффициента магнитомеханической связи; q_{11} – псевдопьезомагнитный коэффициент магнестрикционной фазы; μ – относительная магнитная проницаемость магнестрикционной фазы; μ_0 – магнитная постоянная, равная $4\pi \cdot 10^{-7}$ Н/А²; d_{31} – пьезоэлектрический коэффициент; ${}^p s_{11}$ – коэффициент податливости пьезоэлектрической фазы; ε_{33} – относительная диэлектрическая проницаемость пьезоэлектрической фазы; ε_0 – электрическая постоянная, равная $8,85 \cdot 10^{-12}$ Кл/(Н·м²); c_{11} – эффективный коэффициент жесткости МЭ композита; $\eta = \frac{kl}{2}$; k – волновое число; l – длина МЭ композита.

На рисунке 4 приведена зависимость МЭ коэффициента α от частоты для исследуемых МЭ структур ЦТС-19 / АМАГ-225 с 4 и 5 магнитоотрицательными волокнами, а также с использованием магнитоотрицательной пластины.

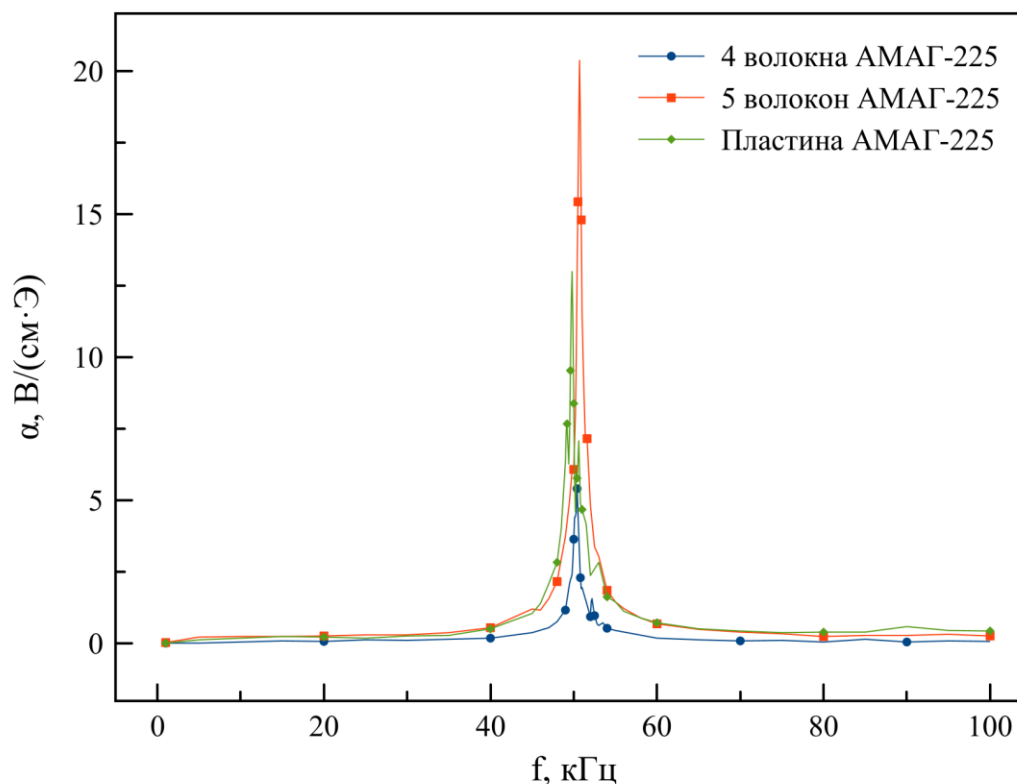


Рисунок 4. График зависимости МЭ коэффициента от частоты для образцов ЦТС-19 / АМАГ-225: синяя линия – с использованием 4 волокон АМАГ-225, оранжевая линия – с использованием 5 волокон АМАГ-225, зеленая линия – с использованием пластины АМАГ-225

В таблице 1 приведены полученные в ходе экспериментальных исследований МЭ структур на основе пьезокерамической пластины ЦТС-19 и магнитоотрицательных волокон из магнитомягкого сплава АМАГ-225 максимальные значения выходного напряжения $U_{\text{макс}}$, МЭ коэффициента по напряжению $\alpha_{\text{макс}}$ и резонансная частота $f_{\text{рез}}$.

Таблица 1. Полученные результаты экспериментальных исследований МЭ структур

№п/п	МЭ структура	$U_{\text{макс}}$, мВ	$\alpha_{\text{макс}}$, В/(см·Э)	$f_{\text{рез}}$, кГц
1	Пластина ЦТС-19 / 4 волокна АМАГ-225	282	5,41	50,4
2	Пластина ЦТС-19 / 5 волокон АМАГ-225	1061	20,36	50,7
3	Пластина ЦТС-19 / пластина АМАГ-225	677	12,99	49,8

Обсуждение результатов

На основании проведенных экспериментальных исследований МЭ структур с использованием пластины из пьезокерамики ЦТС-19 и магнитострикционного аморфного сплава АМАГ-225 (таблица 1), было получено, что МЭ коэффициент по напряжению в структуре с 5 волокнами сплава АМАГ-225, расстояние между которыми составляет от 0,04 мм до 0,35 мм, увеличивается на 73% по сравнению со структурой с 4 волокнами и расстоянием между ними от 0,41 мм до 0,76 мм и на 36% увеличивается по сравнению со структурой с магнитострикционной пластиной. МЭ коэффициент в структуре на основе магнитострикционной и пьезоэлектрической пластин возрастает на 58% по сравнению со структурой, где используется 4 волокна АМАГ-225.

Полученные результаты демонстрируют, что увеличение количества магнитострикционных волокон вместе с уменьшением расстояния между ними приводит к заметному усилению МЭ эффекта, в сравнении со структурами, где используется магнитострикционная пластина или при меньшем числе тех же магнитострикционных волокон с большим расстоянием между ними. Это может быть связано с тем, что магнитострикционная фаза в виде волокон обладает большими степенями свободы, и, при этом, чем меньше между волокнами расстояние, тем с большей площадью пьезоэлектрической фазы они взаимодействуют, тем самым увеличивая МЭ эффект.

Заключение

Область магнитоэлектроники имеет большие перспективы для разработки инновационных устройств и систем на основе уникальных свойства магнитострикционных и пьезоэлектрических материалов. МЭ структуры нашли применение в широком спектре устройств, включая датчики, исполнительные механизмы, сборщики энергии и многие другие устройства и системы мониторинга, измерения и детектирования магнитных и электрических полей.

Продолжающиеся исследования и разработки в области МЭ структур, особенно на основе магнитострикционных и пьезоэлектрических волокон, открывают большие возможности для развития гибкой электроники. Исследования волокнистых МЭ композитов показывают значительный потенциал в плане высокой чувствительности и гибкости, тем самым открывая путь к компактным и легким устройствам.

Проведенное исследование МЭ структур с использованием пьезоэлектрической пластины и магнитострикционных волокон, выявили положительные результаты в повышении МЭ коэффициента. Исследование подчеркивает потенциал разработки высокочувствительных инновационных устройств и систем в области магнитоэлектроники.

В дальнейшем планируется проведение экспериментов по исследованию влияния большого числа магнитострикционных волокон на МЭ эффект в магнитострикционно-пьезоэлектрических структурах.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-15-20044, <https://rscf.ru/project/24-15-20044/>.

Список литературы

1. Иванов С. Н., Семенов Г. А. Технология магнитопьезофибры // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. Севастополь, 2020. 1-1. 314.
2. Патент 184785 Российская Федерация, МПК H01L 41/083 (2006.01). Магнитопьезофибр: № 2018128132: заявлен 2018.07.31; опубликован 2018.11.08 / Бичурин М. И., Семенов Г. А., Иванов С. Н., Леонтьев В. С.; заявитель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого». 5 с.
3. Wang Y., Gray D., Berry D., Viehland D., Gao J., Li J., Li M. An Extremely Low Equivalent Magnetic Noise Magnetoelectric Sensor // Advanced Materials. 2011. 23 (35). 4111-4114. DOI: 10.1002/adma.201100773
4. Джапаридзе М. В., Мусатов В. И., Савельев Д. В., Фетисов Л. Ю. Влияние геометрических характеристик магнитострикционного композита на его магнитострикцию // Оптические технологии, материалы и системы: сборник докладов Российской научно-технической конференции с международным участием (Оптотех – 2020), Москва, 10-11 декабря 2020 г. Москва, 2020. С. 280-284.
5. Джапаридзе М. В., Мусатов В. И., Савельев Д. В., Фетисов Л. Ю. Влияние материала матрицы на магнитострикцию волоконных композитов // Сборник докладов Российской научно-технической конференции с международным участием, Москва, 5-12 апреля 2021 г. Москва, 2021. Том 1. С. 54-59.
6. Bichurin M., Petrov R., Sokolov O., Leontiev V., Kuts V., Kiselev D., Wang Y. Magnetoelectric Magnetic Field Sensors: A Review // Sensors. 2021. 21(18). 6232. DOI: 10.3390/s21186232
7. Turutin A. V., Kubasov I. V., Kislyuk A. M., Kuts V. V., Malinkovich M. D., Parkhomenko Yu. N., Sobolev N. A. Ultra-Sensitive Magnetoelectric Sensors of Magnetic Fields for Biomedical Applications // Nanobiotechnology Reports. 2022. 17. 261-289. DOI: 10.1134/S2635167622030223
8. Bichurin M., Petrov R., Leontiev V., Semenov G., Sokolov O. Magnetoelectric Current Sensors // Sensors. 2017. 17 (6). 1271. DOI: 10.3390/s17061271
9. Lu C., Zhou H., Li L., Yang A., Xu C., Ou Z., Wang J., Wang X., Tian F. Split-core magnetoelectric current sensor and wireless current measurement application // Measurement. 2022. 188 (4). 110527. DOI: 10.1016/j.measurement.2021.110527
10. Dong S. Review on piezoelectric, ultrasonic, and magnetoelectric actuators // Journal of Advanced Dielectrics. 2012. 2(01). 1230001. DOI: 10.1142/S2010135X12300010
11. Sadeghi M., Hojjat Y., Khodaei M. Design, analysis, and optimization of a magnetoelectric actuator using regression modeling, numerical simulation and metaheuristics algorithm // Journal of Materials Science: Materials in Electronics. 2019. 30. 16527-16538. DOI: 10.1007/s10854-019-02029-x

12. Fang K. Y., Jing W. Q., He Y. F., Zhao Y. C., Fang F. A low-frequency vibration energy harvester employing self-biased magnetoelectric composite // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2021. 332 (1). 113066. DOI: 10.1016/j.sna.2021.113066
13. Narita F., Fox M. A Review on Piezoelectric, Magnetostrictive, and Magnetoelectric Materials and Device Technologies for Energy Harvesting Applications // *Advanced Engineering Materials*. 2018. 20 (5). 1700743. DOI: 10.1002/adem.201700743

References

1. Ivanov S. N., Semenov G. A. Tekhnologiya magnitop'yezofibera [Magnetopiezofiber technology] // *Microwave and Telecommunication Technology*. Sevastopol, 2020. 1-1. 314.
2. Bichurin M. I., Semenov G. A., Ivanov S. N., Leontyev V. S. Patent RU No. 184785 U1 Russian Federation, MPK H01L (2006.01). Magnetopiezofiber: No. 2018128132: decl. 2018.07.31; publ. 2018.11.08 / applicant: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Yaroslav-the-Wise Novgorod State University". 5 p.
3. Wang Y., Gray D., Berry D., Viehland D., Gao J., Li J., Li M. An Extremely Low Equivalent Magnetic Noise Magnetoelectric Sensor // *Advanced Materials*. 2011. 23 (35). 4111-4114.
4. Dzhaparidze M. V., Musatov V. I., Savelyev D. V., Fetisov L. Yu. Vliyaniye geometricheskikh kharakteristik magnitostriktsionnogo kompozita na yego magnitostriktsiyu [Influence of geometric characteristics of magnetostrictive composite on its magnetostriction] // *Optical technologies, materials and systems: collection of reports of the Russian scientific and technical conference with international participation (Optotekh – 2020)*. Moscow, 2020. P. 280-284.
5. Dzhaparidze M.V., Musatov V.I., Savelyev D. V., Fetisov L. Yu. Vliyanie materialnaya matritsy na magnitostriktsiyu volokonnykh kompozitov [Impact of matrix materials on fiber composites magnetostriction] // *Collection of reports of the Russian scientific and technical conference with international participation*. 2021. Vol. 1. P. 54-59.
6. Bichurin M., Petrov R., Sokolov O., Leontiev V., Kuts V., Kiselev D., Wang Y. Magnetoelectric Magnetic Field Sensors: A Review // *Sensors*. 2021. 21 (18). 6232.
7. Turutin A. V., Kubasov I. V., Kislyuk A. M., Kuts V. V., Malinkovich M. D., Parkhomenko Yu. N., Sobolev N. A. Ultra-Sensitive Magnetoelectric Sensors of Magnetic Fields for Biomedical Applications // *Nanobiotechnology Reports*. 2022. 17. 261-289.
8. Bichurin M., Petrov R., Leontiev V., Semenov G., Sokolov O. Magnetoelectric Current Sensors // *Sensors*. 2017. 17 (6). 1271.
9. Lu C., Zhou H., Li L., Yang A., Xu C., Ou Z., Wang J., Wang X., Tian F. Split-core magnetoelectric current sensor and wireless current measurement application // *Measurement*. 2022. 188. 110527.
10. Dong S. Review on piezoelectric, ultrasonic, and magnetoelectric actuators // *Journal of Advanced Dielectrics*. 2012. 2 (1). 1230001.
11. Sadeghi M., Hojjat Y., Khodaei M. Design, analysis, and optimization of a magnetoelectric actuator using regression modeling, numerical simulation and metaheuristics algorithm // *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2019. 30. 16527-16538.
12. Fang K. Y., Jing W. Q., He Y. F., Zhao Y. C., Fang F. A low-frequency vibration energy harvester employing self-biased magnetoelectric composite // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2021. 332 (1). 113066. DOI: 10.1016/j.sna.2021.113066
13. Narita F., Fox M. A Review on Piezoelectric, Magnetostrictive, and Magnetoelectric Materials and Device Technologies for Energy Harvesting

Applications // Advanced Engineering Materials. 2018. 20 (5). 1700743.
DOI: 10.1002/adem.201700743

Информация об авторах

Ивашева Елена Евгеньевна – лаборант, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0009-0009-4492-4137, s246709@std.novsu.ru

Леонтьев Виктор Сергеевич – заведующий лабораторией, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0000-0003-1313-1715, Viktor.Leontev@novsu.ru

Осипова Ирина Сергеевна – старший преподаватель, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0009-0005-7850-1694, Irina.Osipova@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