

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

УДК 538.955:621.373

DOI: 10.34680/2076-8052.2025.3(141).506-513

Поступила в редакцию / Received 10.07.2025

ГРНТИ 29.19.37; 45.29.31

Специальность ВАК 1.3.8.

Принята к публикации / Accepted 03.10.2025

Научная статья

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА В СТРУКТУРЕ МЕТГЛАС/ЦТС В СЛАБЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

Мисилин В. А., Кузьмин Е. В., Карпов М. М., Петров Р. В.

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

Аннотация. Статья посвящена исследованию магнитоэлектрического эффекта в магнитоэлектрически-пьезоэлектрических слоистых структурах, предназначенных для использования в устройствах сбора энергии. Были проведены исследования магнитоэлектрического коэффициента для разных составов магнитоэлектрического элемента Метглас/ЦТС. Выявлен состав с максимальной характеристикой магнитоэлектрического коэффициента. В структуре АМАГ492/ЦТС-19 размером 30 x 10 x 0,5 мм на частоте около 52 кГц с 3 слоями метгласа МЭ коэффициент составил около 19 В/(см·Э). Была изучена зависимость магнитоэлектрического эффекта в подмагничивающих полях до 400 Гс. Выявлено, что у образца элемента АМАГ202/ЦТС19 максимум характеристики сдвигается от значения подмагничивающего поля в 9 Гс для одной пластины метгласа до значения 12 Гс для двух пластин и значения 28 Гс для трех пластин. Данные проведенных исследований в дальнейшем будут использованы для разработки и оптимизации устройств сбора энергии на основе мультиферроидных материалов.

Ключевые слова: *магнитоэлектрический эффект, магнитоэлектрически-пьезоэлектрические слоистые структуры, устройства сбора энергии на основе мультиферроидных материалов*

Для цитирования: Мисилин В. А., Кузьмин Е. В., Карпов М. М., Петров Р. В. Исследование магнитоэлектрического эффекта в структуре МЕТГЛАС/ЦТС в слабых магнитных полях // Вестник НовГУ. 2025. 3 (141). 506–513. DOI: 10.34680/2076-8052.2025.3(141).506-513

Research Article

RESEARCH OF MAGNETOELECTRIC EFFECT IN METGLASS/PZT STRUCTURE IN WEAK MAGNETIC FIELD

Misilin V. A., Kuzmin E. V., Karpov M. M., Petrov R. V.

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

Abstract. The article is devoted to the study of the magnetoelectric effect in magnetostrictive–piezoelectric layered structures intended for use in energy harvesting devices. Investigations of the magnetoelectric coefficient were carried out for different compositions of the Metglas/PZT magnetoelectric element. The composition with the maximum magnetoelectric coefficient was identified. In the AMAG492/PZT-19 structure with dimensions of 30×10×0.5 mm at a frequency of about 52 kHz with three Metglas layers, the magnetoelectric coefficient reached approximately 19 V/(cm·Oe). The dependence of the magnetoelectric effect on bias magnetic fields up to 400 Oe was studied. It was revealed that in the AMAG202/PZT-19 element, the maximum response shifts from a bias magnetic field of 9 Oe for one Metglas layer to 12 Oe for two layers, and to 28 Oe for three layers. The results of the conducted research will be further used for the development and optimization of energy harvesting devices based on multiferroic materials.

Keywords: *magnetoelectric effect, magnetostrictive-piezoelectric layered structures, energy harvesting devices based on multiferroic materials*

For citation: Misilin V. A., Kuzmin E. V., Karpov M. M., Petrov R. V. Research of magnetoelectric effect in METGLASS/PZT structure in weak magnetic field // Vestnik NovSU. 3 (141). 506–513. DOI: 10.34680/2076-8052.2025.3(141).506-513

Введение

Развитие перспективных отраслей энергетики, в том числе использующих возобновляемые в природе источники, является наиважнейшей задачей современной индустрии. Это позволит создать распределенные энергетические сети. Одним из компонентов такой сети являются устройства сбора энергии. Они, в свою очередь, используют энергию солнца, ветра, геотермальную энергию и пр. Построены такие устройства могут быть с использованием совершенно различных материалов и на разных принципах. Одним из перспективных решений для создания устройств сбора энергии является генератор на магнитоэлектрическом (МЭ) эффекте, разрабатываемый с использованием мультиферроидных материалов.

МЭ материалы, в том числе магнитострикционно-пьезоэлектрические слоистые структуры, использующие МЭ эффект, который заключается в индуцировании электрической поляризации при воздействии на материал внешнего магнитного поля или индуцировании намагничивания при воздействии на материал внешнего электрического поля, в течение многих лет были предметом исследований, направленных на практическое применение их свойств для создания датчиков магнитных полей нового поколения [1, 2]. При воздействии внешнего магнитного поля МЭ элементы могут быть использованы в качестве высокоточных датчиков для измерения слабых магнитных полей и слабых токов [3].

Опубликовано большое количество статей на тему изучения композиционных материалов на основе МЭ эффекта, содержащих магнитострикционную и пьезоэлектрическую фазы. В то же время изучение устройств на их основе остается перспективным. Например, в работе [4] изучался МЭ эффект в композитной системе Ni/PZT/Ni в условиях слабого постоянного магнитного поля. Был изготовлен слоистый композит, состоящий из дисков из никеля (Ni) и пьезоэлектрика PZT, скрепленных эпоксидным клеем. Исследование включало в себя рентгеноструктурный анализ, электрическую и магнитную поляризацию, а также измерения выходного напряжения магнитоэлектрического отклика с использованием динамического метода, при котором переменное магнитное поле 2–64 Э частотой 1.008 кГц накладывается на постоянное подмагничивающее поле в диапазоне 0,7–5 кЭ. Максимальная зарегистрированная авторами работы величина отклика составила 173,5 мВ/см при помагничивающем поле 0,7 кЭ и переменном магнитном поле 64 кЭ. При этом МЭ коэффициент составил 2,48 мВ/см·Э. Авторы подчеркивают, что многослойная структура обеспечивает более эффективную передачу механических напряжений между магнитострикционной и пьезоэлектрической фазами, что приводит

к более высокому выходному сигналу. Исследование показывает потенциальное применение МЭ эффекта в датчиках слабого магнитного поля [4, 5].

В работе [6] представлен обзор исследований МЭ-эффекта как в однофазных, так и в композитных материалах, с особым акцентом на структуры, содержащие магнитострикционную и пьезоэлектрическую фазы. Авторы объясняют механизм МЭ эффекта, который возникает в результате механического взаимодействия между этими фазами. Отмечено, что однофазные материалы проявляют слабый МЭ-эффект при низких температурах, что ограничивает их практическое применение. В отличие от этого, композиционные материалы обладают значительно более высоким МЭ коэффициентом благодаря свойствам взаимодействующих фаз. Особое внимание уделяется многослойным композитам, включающим материалы с высокой магнитострикционной способностью, такие как Терфенол-D и пьезоэлектрические кристаллы типа PMN-PT, которые обеспечивают эффективную передачу механических напряжений. Рассмотрены различные факторы, влияющие на величину МЭ коэффициента, в том числе соотношение толщин фаз и направление магнитострикции. В статье также анализируются экспериментальные данные, полученные группой авторов, и проводится сравнение их с результатами исследований, подтверждающими преимущества многослойных композитов над другими структурами [6–8]. Характеристики ферромагнетиков, таких как никель и редкоземельные сплавы, такие как Терфенол-D, могут быть рассчитаны с помощью теории магнитострикции, которая хорошо объясняет результаты экспериментов, проведенных с этими материалами [9].

В последние годы активно исследуются новые гибридные и наноструктурированные системы, в том числе супер гидрофобные капельные МЭ гибриды [10], нанокомпозиты на основе ферритов с полимерными матрицами [11], а также оптимизированные МЭ-композиты для беспроводной передачи энергии [2]. Эти работы подчеркивают актуальность направления и расширяют возможности практического применения МЭ структур в сборе энергии.

Целью статьи является исследование МЭ коэффициентов в магнитострикционно-пьезоэлектрических композитах в слабых магнитных полях от 0 до 100 Гс. Это позволит нам выбрать наилучшие комбинации слоев композитов для получения максимальной отдачи энергии в устройствах сбора энергии.

Магнитоэлектрический элемент

В нашем исследовании мы изучали МЭ эффект в слоистых структурах Метглас/ЦТС в нормальных климатических условиях в подмагничивающих полях от 0 до 400 Гс. Для магнитострикционной фазы были выбраны сплавы метгласа производства ПАО «МСТАТОР» (г. Боровичи, РФ) АМАГ 183, АМАГ 200С, АМАГ 202, АМАГ 204N, АМАГ 211N, АМАГ 324, АМАГ 492. В качестве пьезоэлектрической составляющей композита был выбран ЦТС-19 фирмы АО «НИИ «ЭЛПА»

(г. Зеленоград, РФ). Были изготовлены МЭ несимметричные элементы путем склеивания поверхностей пьезоэлектрика и метгласа. Направление поляризации пьезоэлектрика, а также направление постоянного и переменного магнитных полей показаны условно на рисунке 1.

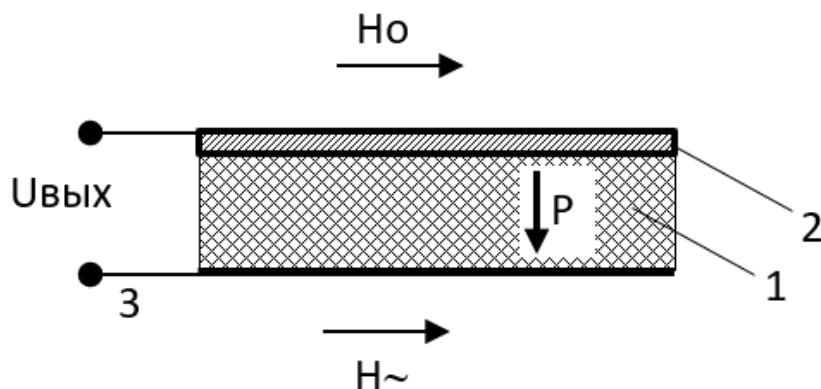


Рисунок 1. МЭ элемент: 1 – ЦТС, 2 – метглас, 3 – электроды

Измерительный стенд

Измерительный стенд был разработан для измерения характеристик МЭ элементов. Структурная схема стенда приведена на рисунке 2.

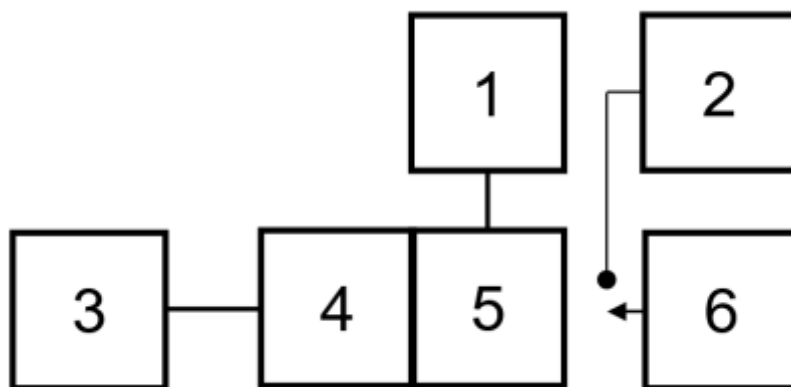


Рисунок 2. Структурная схема стенда. 1 – осциллограф, 2 – магнитометр, 3 – генератор сигналов, 4 – соленоидальная катушка, 5 – МЭ элемент, 6 – постоянный магнит

Стенд состоит из: генератора сигналов цифрового запоминающего осциллографа ADS-2072 (1), магнитометр (2), генератор сигналов GW Instek SFG-71003 (3), соленоидальной катушки (4), МЭ элемента (5), постоянного магнита (6). Данный стенд позволяет измерять напряжение на МЭ элементе в диапазоне частот от 100 Гц до 100 кГц. Далее это значение может быть пересчитано в МЭ коэффициент. Переменное магнитное поле внутри соленоидальной катушки на частоте 1 кГц

составляло 1 Э, постоянное магнитное поле составляло от 0 до 400 Гс в зависимости от расстояния до элемента. МЭ коэффициент измерялся в диапазоне частот 0–100 кГц.

Результаты измерений

Были изготовлены и исследованы несколько слоистых МЭ элементов. Каждый элемент содержал один элемент ЦТС-19 размером $30 \times 10 \times 0,5$ мм и одного, двух или трех пластин метгласа размером $30 \times 10 \times 0,02$ мм. На рисунке 3 приведены данные по МЭ коэффициенту для элементов с разными пластинами метгласа. Электро-механический резонанс в изготовленных МЭ элементах наблюдался на частоте около 50–52 кГц. Значение МЭ коэффициента достигало максимума на резонансной частоте. Максимальное значение МЭ коэффициента наблюдалось при использовании метгласа марки АМАГ 492.

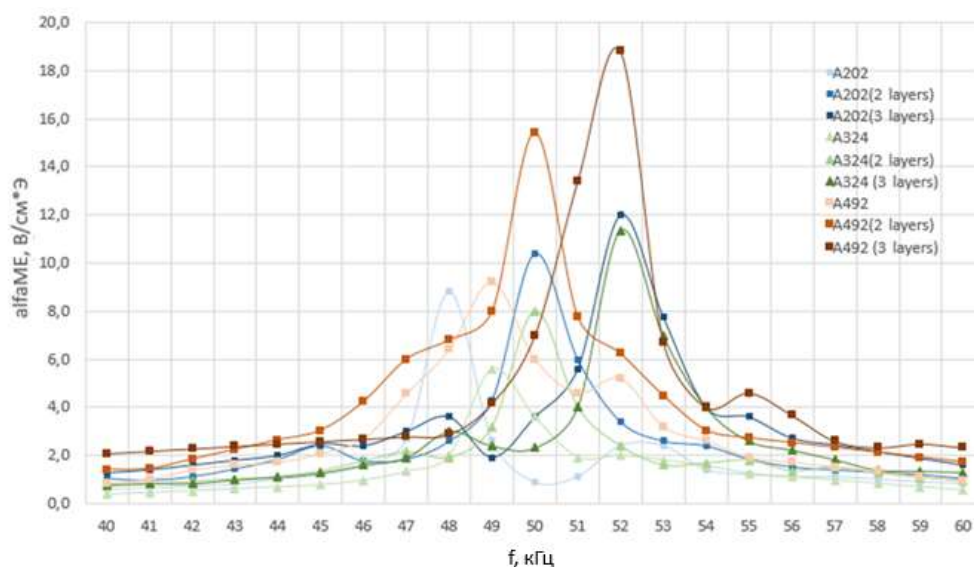


Рисунок 3. Зависимость МЭ коэффициента от частоты

Далее была измерена зависимость МЭ коэффициента от подмагничивающего поля, представленная на рисунке 4.

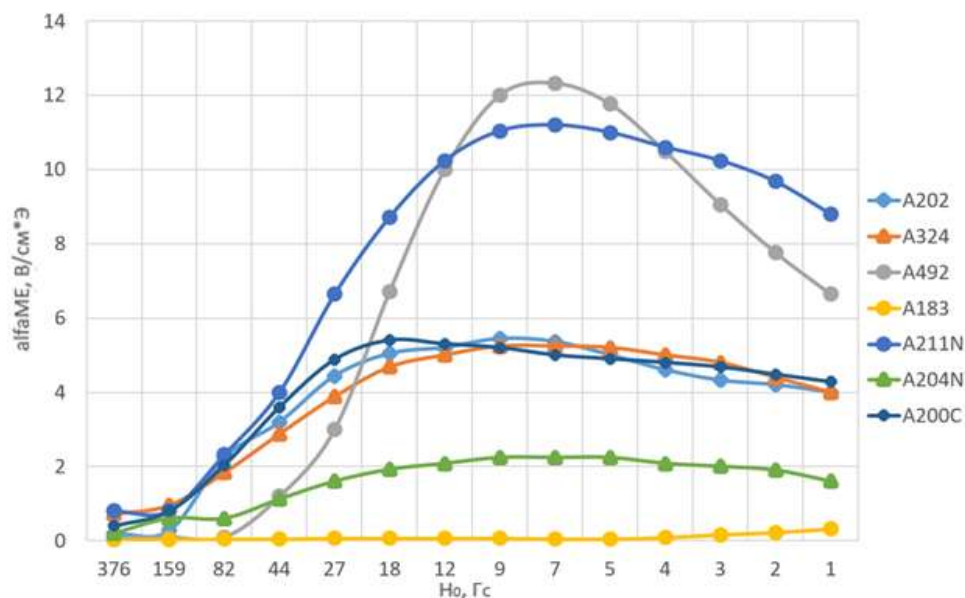


Рисунок 4. Зависимость МЭ коэффициента от подмагничивающего поля в элементах структуры Метглас/ЦТС

Наконец, были проведены исследования МЭ коэффициента при разных величинах подмагничивающего поля в зависимости от числа слоев метгласа для МЭ элемента с метгласом марки АМАГ 202. Эта зависимость представлена на рисунке 5.

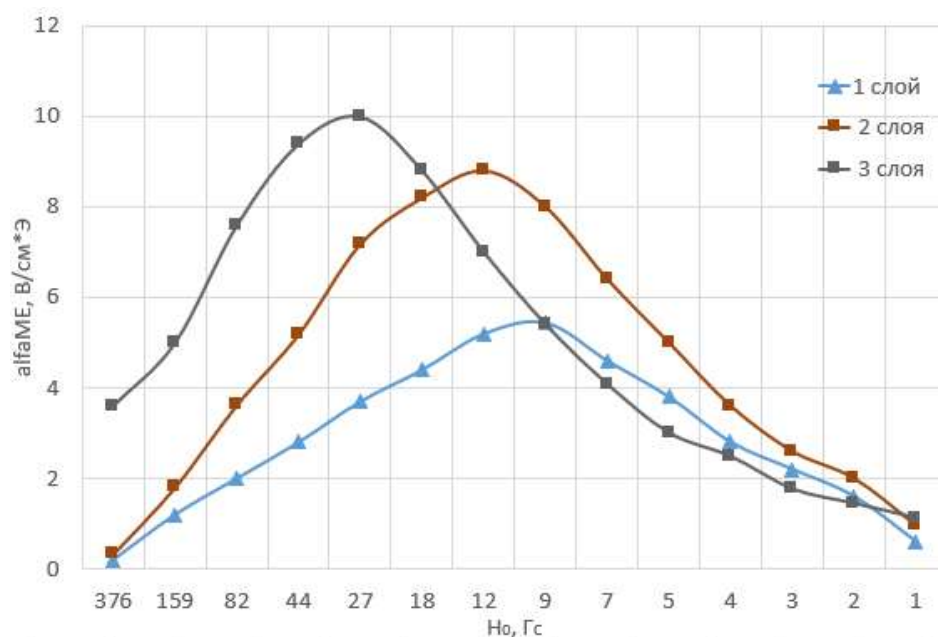


Рисунок 5. Зависимость МЭ коэффициента от подмагничивающего поля для элемента АМАГ202/ЦТС-19 с разным числом слоев метгласа

Выводы

Были проведены исследования МЭ коэффициента для разных составов МЭ элемента Метглас/ЦТС. Выявлен состав с максимальной характеристикой МЭ коэффициента. В структуре АМАГ492/ЦТС-19 размером 30 x 10 x 0,5 мм на частоте около 52 кГц с 3 слоями метгласа МЭ коэффициент составил около 19 В/(см·Э). Была изучена зависимость МЭ эффекта в подмагничивающих полях до 400 Гс. Выявлено, что у образца элемента АМАГ202/ЦТС19 максимум характеристики сдвигается от значения подмагничивающего поля в 9 Гс для одной пластины метгласа до значения 12 Гс для двух пластин и значения 28 Гс для трех пластин. Данные проведенных исследований в дальнейшем будут использованы для разработки и оптимизации устройств сбора энергии на мультиферроидных материалах.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 24-19-20045, <https://rscf.ru/project/24-19-20045/>).

Список литературы / References

1. Nan C. W., Bichurin M. I., Dong Sh., Viehland D., Srinivasan G. Multiferroic magnetoelectric composites: historical perspective, status, and future directions // *Journal of applied physics*. 2008. 103 (3). 031101. DOI: 10.1063/1.2836410
2. Kumar A., Newacheck S., Youssef G. Cumulative optimization of magnetoelectric composite-based wireless energy transfer // *Engineering research express*. 2024. 6. DOI: 10.1088/2631-8695/ad81b0
3. Liang X., Chen H., Sun N. Magnetoelectric materials and devices // *APL Materials*. 2021. 9 (4). 041114. DOI: 10.1063/5.0044532
4. Babu S., Kuchipudi S., Suryanarayana S., Siddeshwar A., Bhimasankaram T. Low magnetic field magnetoelectric studies of Ni/PZT/Ni composite sensor // *National conference on advances in sensors for aerospace applications (14–15 December, 2007)*. India, Hyderabad: Research Centre Imarat Publ., 2007. URL: https://www.researchgate.net/publication/344300082_Low_magnetic_field_magnetoelectric_studies_of_NiPZTNi_composite_sensor/references#fullTextFileContent (Accessed: 07.07.2025).
5. Deng Zh., Dapino M. Review of magnetostrictive vibration energy harvesters // *Smart materials and structures*. 2017. 26 (10). 103001. DOI: 10.1088/1361-665X/aa8347
6. Ryu J., Priya Sh., Uchino K., Kim H.-J. Magnetoelectric effect in composites of magnetostrictive and piezoelectric materials // *Journal of electroceramics*. 2002. 8. 107–119. DOI: 10.1023/A:1020599728432
7. Bochenek D., Niemiec P., Chrobak A. Effect of chemical composition on magnetic and electrical properties of ferroelectromagnetic ceramic composites // *Materials*. 2021. 14. 2488.
8. Bochenek D., Chrobak A., Dercz G., Niemiec P., Brzezińska D., Czaja P. The Influence of Terfenol-D content on the structure and properties of multiferroic

composites obtained based on PZT-type material and Terfenol-D // *Materials*. 2025. 18. 235. DOI: 10.3390/ma18020235

9. Li P., Wen Y., Bian L. Enhanced magnetoelectric effects in composite of piezoelectric ceramics, rare-earth iron alloys, and ultrasonic horn // *Applied physics letters*. 2007. 90. 022503. DOI: 10.1063/1.2431469

10. Ma Z., Ai J., Shi Y., Wang K., B Su. A superhydrophobic droplet - based magnetoelectric hybrid system to generate electricity and collect water simultaneously // *Advanced materials*. 2020. 32. 2006839.

11. Prahadan S., Deshmukh P., Jha S. N., Satapathy S., Majumder S. Solar energy harvesting in magnetoelectric coupled manganese ferrite nanoparticles incorporated nanocomposite polymer films // *arXiv:2211.01007*. URL: <https://arxiv.org/abs/2211.01007>. DOI: 10.48550/arXiv.2211.01007

Сведения об авторах

Мисилин Василий Александрович – аспирант, инженер-исследователь, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0000-0001-5044-5831, marsbasil@yandex.ru

Кузьмин Евгений Валентинович – младший научный сотрудник, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0000-0001-7348-290X, 7777744444@mail.ru

Карпов Михаил Михайлович – аспирант, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0009-0000-4343-5897, s224890@std.novsu.ru

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