

**К 90-ЛЕТИЮ  
ВЛАДИМИРА ГРИГОРЬЕВИЧА ШАВРОВА**

УДК 537.633

**ПРИМЕНЕНИЕ ТЕРМООБРАБОТКИ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ  
МАГНИСТРИКЦИОННОЙ КОМПОНЕНТЫ  
МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КОМПОЗИТА**

© 2023 г. **Е. Е. Ивашева<sup>а</sup>, \* , В. С. Леонтьев<sup>а</sup>, М. И. Бичурин<sup>а</sup>, В. В. Коледов<sup>б</sup>**

<sup>а</sup> *Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого,  
ул. Большая Санкт-Петербургская, 41, Великий Новгород, 173001 Российская Федерация*

<sup>б</sup> *Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,  
ул. Моховая, 11, стр. 7, Москва, 125009 Российская Федерация*

\*E-mail: ellen9879@yandex.ru

Поступила в редакцию 16.09.2022 г.

После доработки 26.10.2022 г.

Принята к публикации 26.10.2022 г.

Исследовано влияние термообработки магнитоэлектрической компоненты в магнитоэлектрических (МЭ) композитах, состоящих из пьезоэлектрического и магнитоэлектрического материала. Экспериментально найдена зависимость МЭ коэффициента по напряжению от частоты без термообработки и с отжигом от 200 до 500 °С аморфного сплава АМАГ493, который выступал в роли магнитоэлектрической компоненты. Показано, что с увеличением температуры обработки аморфного сплава наблюдается увеличение МЭ-коэффициента по напряжению: максимальное значение МЭ коэффициента наблюдалось при температуре 350 °С и составило 29.52 В см<sup>-1</sup> Э<sup>-1</sup> на частоте резонанса 54 кГц. Доказано, что увеличение МЭ-коэффициента по напряжению происходит за счет улучшения характеристик аморфного сплава в ходе термической обработки, приводящей к частичной нанокристаллизации материала.

DOI: 10.31857/S0033849423040034, EDN: PETZWT

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время активно проводятся исследования магнитоэлектрического (МЭ) эффекта в структурах с использованием магнитоэлектрических и пьезоэлектрических материалов. В таких структурах МЭ-эффект является результатом взаимодействия магнитоэлектрической и пьезоэлектрической фаз, т.е. электрическая поляризация индуцируется внешним переменным магнитным полем в присутствии постоянного подмагничивающего поля. Значение МЭ-эффекта характеризуется МЭ-коэффициентом по напряжению  $\alpha$ .

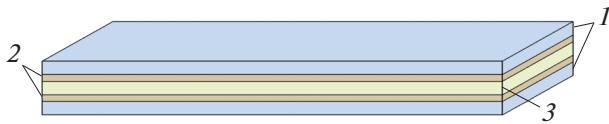
Почти во всех монокристаллических мультиферроиках МЭ-эффект довольно незначителен, не превышает 20 мВ см<sup>-1</sup> Э<sup>-1</sup>, и наблюдается, как правило, при низких температурах или в больших магнитных полях, что обуславливает их малое практическое применение. В композитных же структурах, которые содержат магнитоэлектрическую и пьезоэлектрическую фазы, наблюдается гораздо больший по величине МЭ-эффект, поэтому они находят значительно большее практическое применение в различных устройствах на основе данного эффекта. Такими устройствами, например, являются высокочувствительные датчики магнит-

ных полей [1–9]. Как следствие, одной из важнейших задач является повышение чувствительности различных датчиков, где в качестве чувствительного элемента используется МЭ-композит. Исследования, проводимые в данном направлении, показывают, что увеличить величину МЭ-эффекта возможно при переходе аморфной структуры магнитоэлектрического материала в частичное нанокристаллическое состояние при термической обработке [10].

Цель данной работы – повышение чувствительности магнитоэлектрического композита к магнитному полю для проектирования перспективных высокочувствительных датчиков.

## 1. ПОДГОТОВКА МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ

Экспериментальное исследование влияния термообработки на величину МЭ-коэффициента проводили на магнитоэлектрично-пьезоэлектрических МЭ-структурах. На рис. 1 приведен схематичный вид исследуемой МЭ-структуры, которая содержит магнитоэлектрическую пласти-



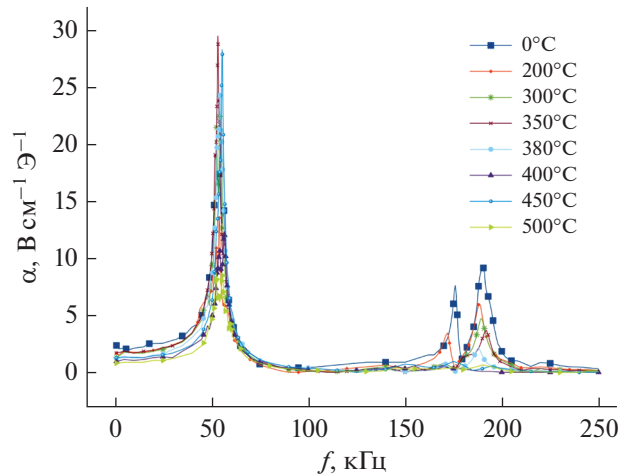
**Рис. 1.** Магнитоэлектрическая структура: 1 – магнитоотрицательная пластина аморфного сплава, 2 – клеящая прослойка, 3 – пьезоэлектрическая пластина.

ну аморфного сплава АМАГ493 (Метглас), клей БФ-2 и пьезоэлектрическую пластину ЦТС-19.

В качестве магнитоотрицательной фазы МЭ-композиата был использован аморфный сплав АМАГ493, изготавливаемый на ПАО “Мстатор” (г. Боровичи, Россия). Пластины Метгласа размером  $30 \times 10 \times 0.02$  мм подвергали термической обработке в муфельной печи KSL-1200X-UL (MTI Corp.). Пластины помещали в нагревательную область, и нагревали до заданной температуры в течение 15 мин (температуры отжига составляли 200, 300, 350, 380, 400, 450 и 500°C). Затем Метглас выдерживали при заданной температуре в течение 60 мин, а далее затем пластины охладили до комнатной температуры. В качестве пьезоэлектрика использовали пластины ЦТС-19 размером  $30 \times 10 \times 0.5$  мм. После термообработки Метгласа на каждую пластину ЦТС приклеивали по шесть пластин магнитоотрицательного материала, по три пластины с каждой стороны. Соединение всех слоев производили с помощью клея БФ-2. Образцы сушили в течение 24 ч при комнатной температуре.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ

Экспериментальное исследование МЭ-образцов осуществлялось в области электромеханического резонанса в режиме продольной моды. Измерительный стенд включал в себя цифровой синхронный усилитель MFLI (Zurich Instruments), магнитометр Dexing Magnet DX-180, катушку индуктивности и постоянный магнит. На катушку индуктивности подавался переменный сигнал с встроенного генератора цифрового синхронного усилителя, за счет чего создавалось переменное магнитное поле. При помощи постоянного магнита происходило создание постоянного подмагничивающего поля. В результате воздействия указанных магнитных полей, из-за поперечного МЭ-эффекта, на обкладках МЭ-образца индуцировался электрический сигнал, фиксирование которого осуществлялось при помощи управляющего программного обеспечения LabOne от Zurich Instruments. Величину постоянного магнитного поля измеряли с помощью магнитометра.



**Рис. 2.** Зависимость МЭ-коэффициента по напряжению от частоты.

## 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате исследования были получены графики зависимостей МЭ-коэффициента по напряжению от частоты в полученных композитных МЭ-структурах. На рис. 2 приведены экспериментальные зависимости  $\alpha$  от частоты переменного магнитного поля  $f$ . Как видно из рис. 2, наибольшие значения МЭ-коэффициента наблюдаются при температурах обработки Метгласа 350 и 450°C.

В табл. 1 приведены максимальные значения МЭ-коэффициента по напряжению  $\alpha$  и значения частоты резонанса  $f_{рез}$  для образцов с различной термообработкой магнитоотрицательной компоненты. Из приведенных данных следует, что максимальное значение МЭ-коэффициента  $\alpha$  составляет  $29.52 \text{ В см}^{-1} \text{ Э}^{-1}$  при температуре 350°C на частоте продольного резонанса  $f_{рез} = 53.4 \text{ кГц}$ . Без термообработки Метгласа максимальное значение МЭ-коэффициента достигает  $14.44 \text{ В см}^{-1} \text{ Э}^{-1}$  на частоте 54 кГц. Отсюда следует, что термообработка магнитоотрицательной компоненты поз-

**Таблица 1.** Максимальные значения МЭ-коэффициента по напряжению  $\alpha$  и значения частоты резонанса  $f_{рез}$

$t_{обр}, \text{ }^\circ\text{C}$	$\alpha, \text{ В см}^{-1} \text{ Э}^{-1}$	$f_{рез}, \text{ кГц}$
0	17.44	54
200	13.6	54.1
300	22.88	54.3
350	29.52	53.4
380	24.32	54.4
400	12.4	56.7
450	28.32	55.61
500	8.8	52.5

воляет увеличить МЭ-коэффициент по напряжению более чем на 40%.

Кроме того, у МЭ-образцов с пластинами Метгласа, которые прошли термообработку, сначала наблюдается возрастание величины постоянного подмагничивающего поля  $H$  в сравнении с образцом, на котором магнестрикционные пластины не подвергались отжигу, а затем происходит уменьшение величины  $H$ .

Ниже приведена зависимость величины постоянного магнитного поля подмагничивания  $H$  от температуры обработки пластин Метгласа  $t_{\text{обр}}$ , полученная в ходе эксперимента:

$t_{\text{обр}}, ^\circ\text{C}$	$H, \text{Э}$
0	13
200	30
300	40
350	44
380	38
400	17
450	15
500	14

Как видно из приведенных результатов, наибольшее значение  $H$  составляет 44 Э, что и соответствует температуре обработки аморфного сплава 350°C.

Явление увеличения МЭ-эффекта, которое наблюдается после термообработки Метгласа, можно связать с кристаллизацией материала, в ходе которой наблюдается образование и рост кристаллов. В результате этого процесса происходит большая упорядоченность магнитных доменов в структуре аморфного сплава [11–13]. Таким образом, используя термическую обработку магнестрикционной компоненты при создании МЭ-композитов, можно улучшить определенные свойства материала и, следовательно, повлиять на увеличение МЭ-эффекта.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования были изготовлены МЭ-структуры, магнестрикционные пластины которых были подвергнуты отжигу при температурах от 200 до 500°C и которые не подвергались воздействию температуры. Полученные данные показывают, что при температуре отжига 350°C аморфный сплав начинает нанокристаллизоваться и за счет этого наблюдается увеличение МЭ-эффекта и, соответственно, МЭ-

коэффициента по напряжению, который составил 29.52 В см<sup>-1</sup> Э<sup>-1</sup> на частоте 53.4 кГц. Возрастание МЭ-коэффициента по напряжению в композитных структурах открывает возможность повышения чувствительности различных датчиков, в основе которых лежит МЭ-эффект.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 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.
2. Nan C.-W., Bichurin M.I., Dong S. et al. // *J. Appl. Phys.* 2008. V. 103. № 3. P. 031101. <https://doi.org/10.1063/1.2836410>
3. Wang Y., Gray D., Berry D. et al. // *Adv. Mater.* 2011. V. 23. № 35. P. 4111. <https://doi.org/10.1002/adma.201100773>
4. Bichurin M., Petrov R., Sokolov O. et al. // *Sensors*. 2021. V. 21. № 18. P. 6232. <https://doi.org/10.3390/s21186232>
5. Wang Y., Li J., Viehland D. // *Mater. Today*. 2014. V. 17. № 6. P. 269. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2014.05.004>
6. Dong S., Liu J.-M., Cheong S.W., Ren Z. // *Adv. Phys.* 2015. V. 64. № 5–6. P. 519. <https://doi.org/10.1080/00018732.2015.1114338>
7. Palneedi H., Annapureddy V., Priya S., Ryu J. // *Actuators*. 2016. V. 5. № 1. Article No. 5010009. <https://doi.org/10.33990/act5010009>
8. Chu Z., Pourhosseiniasl M., Dong S. // *J. Phys. D Appl. Phys.* 2018. V. 51. № 24. P. 243001. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/aac29b>
9. Leung C.M., Li J., Viehland D., Zhuang X. // *J. Phys. D Appl. Phys.* 2018. V. 51. № 26. P. 263002. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/aac60b>
10. Deng T., Chen Z., Di W. et al. // *Smart Mater. Struct.* 2021. V. 30. № 8. P. 085005. <https://doi.org/10.1088/1361-665X/ac0858>
11. Katakam S., Hwang J.Y., Vora H. et al. // *Scripta Mater.* 2012. V. 66. № 8. P. 538. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2011.12.028>
12. Jiang W.H., Atzmon M. // *Scripta Mater.* 2006. V. 54. № 4. P. 333. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2005.09.052>
13. Datta A., Nathasingh D., Martis R.J. et al. // *J. Appl. Phys.* 1984. V. 55. № 6. P. 1784. <https://doi.org/10.1063/1.333477>