

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

УДК 534:537.8:678.073

DOI: 10.34680/2076-8052.2023.5(134).743-749

ГРНТИ 29.37.03+29.05.33+61.59.37

Специальность ВАК 1.3.8

Научная статья

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРОДОЛЬНО-СДВИГОВОЙ И КРУТИЛЬНОЙ МОД В НЕСИММЕТРИЧНЫХ СТРУКТУРАХ

Иванов С. В., Соколов О. В., Бичурин М. И., Захаров М. А., Петров Р. В.

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

Аннотация В данной работе проведено теоретическое исследование возможности идентификации крутильной моды колебаний на фоне продольно-сдвиговой в несимметричных МЭ композитах Метглас / GaAs и Метглас / биморфный LN Zyl + 45°. Определено, что для изучения крутильной моды МЭ эффекта рекомендуется применять МЭ композиты с биморфным LN Zyl + 45° в качестве пьезоэлектрика. Обусловлено это тем, что МЭ композите с биморфным LN Zyl + 45° продольно-сдвиговая мода не возбуждается и МЭ коэффициент по напряжению определяется вкладом только крутильной моды колебаний.

Ключевые слова: магнитоэлектрический эффект, продольно-сдвиговая мода, крутильная мода, GaAs, биморфный LN Zyl + 45°

Для цитирования: Иванов С. В., Соколов О. В., Бичурин М. И., Захаров М. А., Петров Р. В. Исследование магнитоэлектрических продольно-сдвиговой и крутильной мод в несимметричных структурах // Вестник НовГУ. 2023. 5(134). 743-749. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.5(134).743-749

Research Article

RESEARCH OF MAGNETOELECTRIC LONGITUDINAL-SHEAR AND TORSIONAL MODES IN ASYMMETRIC STRUCTURES

Ivanov S. V., Sokolov O. V., Bichurin M. I., Zakharov M. A., Petrov R. V.

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

Abstract The theoretical study of possibility for the torsional mode identification against the background of longitudinal-shear one in asymmetric ME composites Metglas / GaAs and Metglas / bimorph LN Zyl + 45° is carried out in this paper. It is determined that ME composites with bimorph LN Zyl + 45° are better to use as a piezoelectric to study the torsional mode of the ME effect. This is due to the fact that the longitudinal-shear mode is not excited in the ME composite with a bimorph LN Zyl + 45°, and the ME voltage coefficient depends only on the torsional mode.

Keywords: magnetoelectric effect, longitudinal-shear mode, torsional mode, GaAs, bimorph LN Zyl + 45°

For citation: Ivanov S. V., Sokolov O. V., Bichurin M. I., Zakharov M. A., Petrov R. V. Research of magnetoelectric longitudinal-shear and torsional modes in asymmetric structures // Vestnik NovSU. 2023. 5(134). 743-749. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.5(134).743-749

Введение

В ранее выполненных исследованиях было определено, что в несимметричном магнитоэлектрическом (МЭ) композите при ориентации

постоянного и переменного магнитных полей, показанной на рисунке 1, возникают как продольно-сдвиговая, так и крутильная моды колебаний в ходе прямого МЭ эффекта. Причем резонансная частота колебаний продольно-сдвиговой моды и крутильной моды незначительно отличаются, а величина МЭ коэффициента по напряжению при продольно-сдвиговой моде на порядок больше, чем при крутильной.

В данной работе исследуется возможность идентификации крутильной моды колебаний на фоне продольно-сдвиговой в несимметричных МЭ композитах Метглас / GaAs и Метглас / биморфный LN Zyl + 45°.

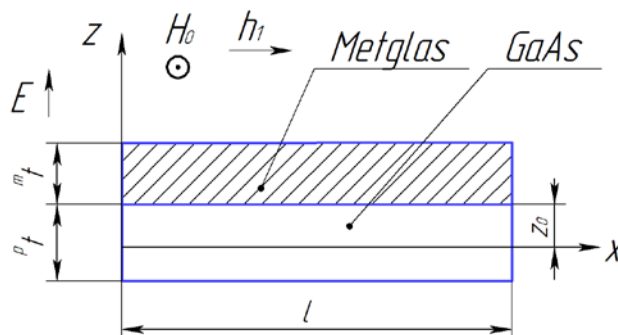


Рисунок 1. Несимметричный МЭ композит Метглас / GaAs

На рисунке 1:

H_0 – внешнее постоянное подмагничивающее поле.

h_1 – внешнее переменное магнитное поле,

E – напряженность электрического поля, возникающая в МЭ композите,

mt – толщина магнитострикционной фазы,

pt – толщина пьезоэлектрической фазы,

l – длина МЭ композита,

z_0 – положение оси вращения МЭ композита относительно магнитострикционной фазы при крутильной моде колебаний.

МЭ композит – это механически связанные друг с другом пьезоэлектрический и магнитострикционный материал, которые в совокупности индуцируют электрическое напряжение в пьезоэлектрической фазе или намагниченность в магнитострикционной фазе в ходе прямого и обратного МЭ эффектов соответственно [1]. МЭ композиты могут быть использованы при проектировании различных устройств, таких как датчики магнитного поля (переменного и (или) постоянного тока), преобразователи, фильтры, генераторы, фазовращатели, трансформаторы, гираторы, датчики тока, устройства преобразования мощности, низкочастотные антенны [2-11]. В качестве пьезоэлектрика применяются такие материалы как ЦТС, GaAs, PMN-PT, биморфный LN Zyl + 45° и т. д. В качестве магнитострикционных материалов часто применяются Метглас, Terfenol-D, никель, ЖИГ и т. д. Исследовано также множество конструкций МЭ композитов: в виде

тонкой прямоугольной пластинки с различными размерами и конфигурациями пьезоэлектрической и магнитострикционной фаз, конструкции типа Розен, тороидальной структуры и т. д.

Прямой МЭ коэффициент по напряжению и обратный МЭ коэффициент рассчитываются через материальные параметры магнитострикционной и пьезоэлектрической фаз композитов. К данным параметрам относятся: пьезоэлектрический коэффициент, псевдо-пьезомагнитный коэффициент, модули податливости и упругости, соотношение толщины пьезоэлектрической фазы к толщине магнитострикционной фазы композита и т. д. Подробно методика расчета МЭ коэффициентов по напряжению при продольно-сдвиговой и крутильной модах рассматривается в работе [12], по этой же методике далее рассчитываются частотные зависимости МЭ коэффициентов по напряжению для данных мод МЭ эффекта. Данные МЭ коэффициенты максимальны при резонансной частоте механических колебаний МЭ композита, которая также зависит от геометрических размеров и материальных параметров фаз композитов.

Теоретические расчеты МЭ коэффициентов по напряжению

На рисунке 2 представлены результаты теоретических расчетов МЭ коэффициентов по напряжению для МЭ композита Метглас / GaAs с размерами $l=23$ мм, $t=29$ мкм, $p_t=0,2$ мм при продольно-сдвиговой и крутильной модах.

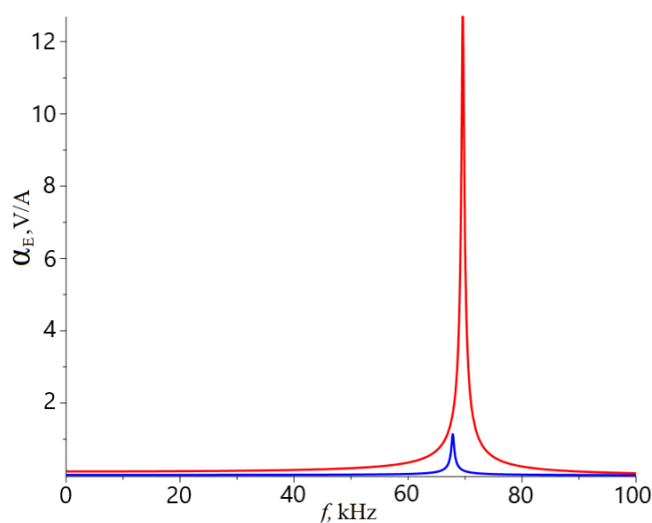


Рисунок 2. Теоретическая зависимость МЭ коэффициентов по напряжению от частоты переменного магнитного поля для несимметричного МЭ композита Метглас / GaAs. Красная линия – продольно-сдвиговая мода, синяя линия – крутильная мода

Так как в несимметричном МЭ композите Метглас / GaAs возникает одновременно и продольно-сдвиговая, и крутильная моды при ориентации магнитных полей, показанной на рисунке 1, то полный МЭ коэффициент по напряжению для композита Метглас / GaAs складывается из МЭ коэффициентов по напряжению при продольно-сдвиговой и крутильной модах.

На рисунке 3 представлен результат теоретического расчета суммы МЭ коэффициентов по напряжению при продольно-сдвиговой и крутильной модах для МЭ композита Метглас / GaAs.

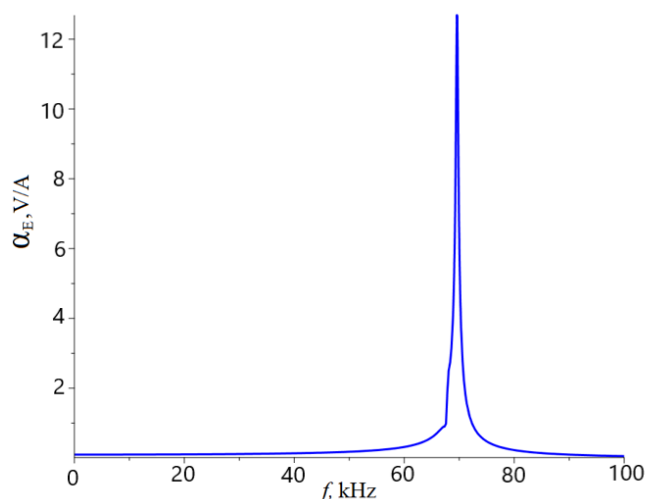


Рисунок 3. Теоретическая зависимость суммарного МЭ коэффициента по напряжению от частоты переменного магнитного поля для несимметричного МЭ композита Метглас / GaAs при продольно-сдвиговой и крутильной модах

Согласно теоретической зависимости на рисунке 3 вклад крутильной моды в суммарный МЭ коэффициент для несимметричного МЭ композита Метглас / GaAs практически незаметен, поэтому резонансную частоту и резонансное значение МЭ коэффициента по напряжению при крутильной моде в композитах, основанных на данных материалах трудно определить экспериментально.

Одним из возможных выходов из этой ситуации может быть применение в МЭ структуре в качестве пьезоэлектрической фазы биморфного LN Zyl + 45°, у которого 2 слоя одинаковой толщины поляризованы в противоположных направлениях вдоль толщины (см. рисунок 4). За счет противоположного направления поляризации в двух слоях биморфа значения пьезокоэффициентов h_{36} будут противоположны по знаку. Поэтому продольно-сдвиговая мода МЭ эффекта в такой МЭ структуре возбуждаться не будет. В этом случае в эксперименте может наблюдаться только МЭ эффектот крутильной моды. Таким образом, продольно-сдвиговая мода, мешающая наблюдению крутильной моды, будет устранена. Результаты теоретического расчета МЭ коэффициента по напряжению для крутильной моды для МЭ композита Метглас / биморфный LN Zyl + 45° представлены на рисунке 5. Размеры фаз композита Метглас / биморфный LN Zyl + 45°: $l=23$ мм, $m_t=29$ мкм, $p_t=0,4$ мм.

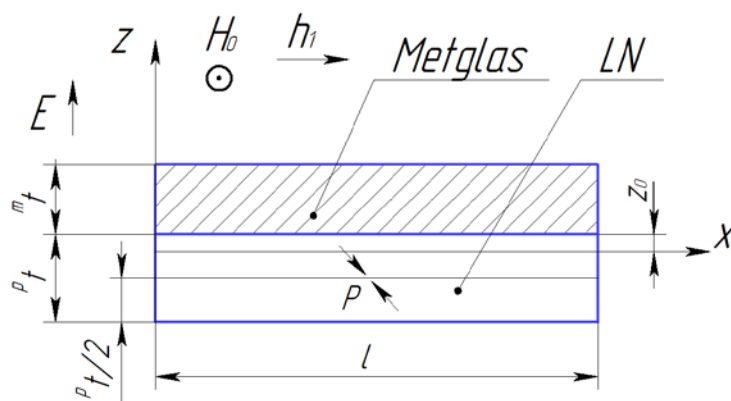


Рисунок 4. Несимметричный МЭ композит Метглас / биморфный LN Zyl + 45°

На рисунке 4: P – электрическая поляризация пластин биморфного LN Zyl + 45° по толщине, остальные обозначения те же, что и на рисунке 1.

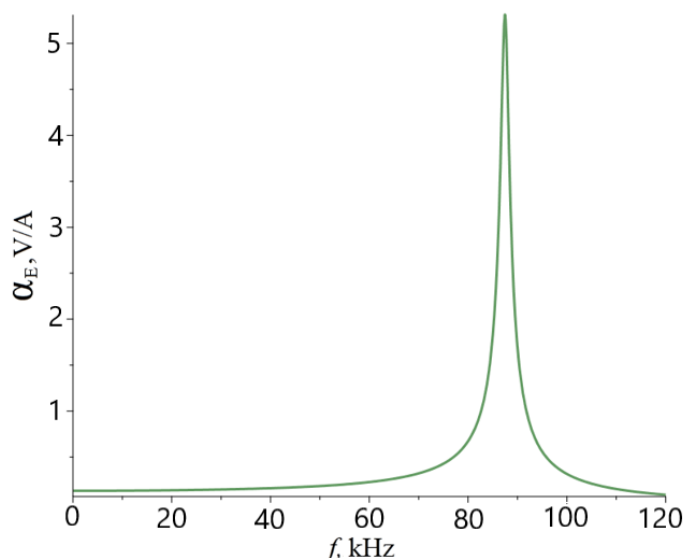


Рисунок 5. Теоретическая зависимость МЭ коэффициента по напряжению от частоты переменного магнитного поля для несимметричного МЭ композита Метглас / биморфный LN Zyl + 45° для крутильной моды

Обсуждение результатов

По результатам расчетов на рисунках 2 и 5 резонансная частота прямого МЭ эффекта на крутильной моде колебаний для МЭ композита Метглас / GaAs равна примерно 68 кГц, а для МЭ композита Метглас / биморфный LN Zyl + 45° равна примерно 87 кГц. При этом продольно-сдвиговая мода, маскирующая крутильную моду в МЭ композите Метглас / GaAs, в МЭ композите Метглас / биморфный LN Zyl + 45° не возникает. В связи с этим для изучения крутильной моды МЭ эффекта рекомендуется применять МЭ композиты с биморфным LN Zyl + 45° в качестве пьезоэлектрика.

Заключение

В работе приведены результаты вычислений амплитуд и резонансных частот продольно-сдвиговой и крутильной мод в МЭ композите Метглас / GaAs. Показано, что идентификация крутильной моды может быть выполнена участием биморфной структуры в композите Метглас / биморфный LN Zyl + 45°.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22–29–00950, <https://rscf.ru/project/22-29-00950/>.

Список литературы

1. Nan C.-W., Bichurin M.I., Dong S., Viehland D., Srinivasan G. Multiferroic magnetoelectric composites: Historical perspectives, status, and future directions // Journal of Applied Physics. 2008. 103(3). 031101. DOI: 10.1063/1.2836410

2. Liang X., Chen H., Sun N. X. Magnetoelectric materials and devices // *APL Materials*. 2021. 9(4). 041114. DOI: 10.1063/5.0044532
3. Марков И. Ю., Ивашева Е. Е., Соколов О. В., Леонтьев В. С., Бичурин М. И. Магнитоэлектрический эффект в тороидальных структурах Metglas/PZT/Metglas // *Вестник НовГУ*. 2023. 1(130). 186-191. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.1(130).186-191
4. Zhang J., Zhu W. I., Filippov D. A., He W., Chen D., Li K., Geng S., Zhang Q., Jiang L., Cao L., Timilsina R., Srinivasan G. Highly efficient power conversion in magnetoelectric gyrators with high quality factor // *Review of Scientific Instruments*. 2019. 90(1). 015004. DOI: 10.1063/1.5082833
5. Gao J., Jiang Z., Zhang S., Mao Z., Shen Y., Chu Z. Review of Magnetoelectric Sensors // *Actuators*. 2021. 10(6). 109-132. DOI: 10.3390/act10060109
6. Lin H., Page M. R., McConney M., Jones J., Howe B., Sun N. X. Integrated magnetoelectric devices: Filters, pico-Tesla magnetometers, and ultracompact acoustic antennas // *MRS Bulletin*. 2018. 43(11). 841-847. DOI: 10.1557/mrs.2018.257
7. Dong C., He Y., Li M., Tu C., Chu Z., Liang X., Chen H., Wei Y., Zaeimbashi M., Wang X., Lin H., Gao Y., Sun N. X. A Portable Very Low Frequency (VLF) Communication System Based on Acoustically Actuated Magnetoelectric Antennas // *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2020. 19(3). 398-402. DOI: 10.1109/LAWP.2020.2968604
8. Jung S.-X., Lee G., wan Kim T., Kim S.-J., Koh J.-X. Rosen-Type Piezoelectric Transformers Based on 0.5Ba(Zr0.2Ti0.8)O3–0.5(Ba0.7Ca0.3)TiO3 Ceramic and Doped with Sb2O3 // *Materials*. 2023. 16(18). 6201. DOI: 10.3390/ma16186201
9. Chu Z., Annapureddy V., Pourhosseini Asl M., Palneedi H., Ryu J., Dong S. Dual-stimulus magnetoelectric energy harvesting // *Materials for Energy Harvesting*. 2018. 43(3). 199-205. DOI: 10.1557/mrs.2018.31
10. 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.
11. 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
12. Bichurin M., Sokolov O., Ivanov S., Leontiev V., Petrov D., Semenov G., Lobekin V. Physics of Composites for Low-Frequency Magnetoelectric Devices // *Sensors*. 2022. 22(13). 4818. DOI: 10.3390/s22134818

References

1. Nan C.-W., Bichurin M.I., Dong S., Viehland D., Srinivasan G. Multiferroic magnetoelectric composites: Historical perspectives, status, and future directions // *Journal of Applied Physics*. 2008. 103(3). 031101. DOI: 10.1063/1.2836410
2. Liang X., Chen H., Sun N. X. Magnetoelectric materials and devices // *APL Materials*. 2021. 9(4). 041114. DOI: 10.1063/5.0044532
3. Markov I. Iu., Ivasheva E. E., Sokolov O. V., Leont'ev V. S., Bichurin M. I. Magnitoelektricheskii effekt v toroidal'nykh strukturakh Metglas/PZT/Metglas [Magnetoelectric effect in Metglas/PZT/Metglas toroidal structures] // *Vestnik NovSU*. 2023. 1(130). 186-191. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.1(130).186-191
4. Zhang J., Zhu W. I., Filippov D. A., He W., Chen D., Li K., Geng S., Zhang Q., Jiang L., Cao L., Timilsina R., Srinivasan G. Highly efficient power conversion in magnetoelectric gyrators with high quality factor // *Review of Scientific Instruments*. 2019. 90(1). 015004. DOI: 10.1063/1.5082833

5. Gao J., Jiang Z., Zhang S., Mao Z., Shen Y., Chu Z. Review of Magnetoelectric Sensors // *Actuators*. 2021. 10(6). 109-132. DOI: 10.3390/act10060109
6. Lin H., Page M. R., McConney M., Jones J., Howe B., Sun N. X. Integrated magnetoelectric devices: Filters, pico-Tesla magnetometers, and ultracompact acoustic antennas // *MRS Bulletin*. 2018. 43(11). 841-847. DOI: 10.1557/mrs.2018.257
7. Dong C., He Y., Li M., Tu C., Chu Z., Liang X., Chen H., Wei Y., Zaeimbashi M., Wang X., Lin H., Gao Y., Sun N. X. A Portable Very Low Frequency (VLF) Communication System Based on Acoustically Actuated Magnetoelectric Antennas // *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2020. 19(3). 398-402. DOI: 10.1109/LAWP.2020.2968604
8. Jung S.-X., Lee G., wan Kim T., Kim S.-J., Koh J.-X. Rosen-Type Piezoelectric Transformers Based on 0.5Ba(Zr0.2Ti0.8)O3–0.5(Ba0.7Ca0.3)TiO3 Ceramic and Doped with Sb2O3 // *Materials*. 2023. 16(18). 6201. DOI: 10.3390/ma16186201
9. Chu Z., Annapureddy V., PourhosseiniAsl M., Palneedi H., Ryu J., Dong S. Dual-stimulus magnetoelectric energy harvesting // *Materials for Energy Harvesting*. 2018. 43(3). 199-205. DOI: 10.1557/mrs.2018.31
10. 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.
11. Leont'ev V. S., Petrov R. V., Bozhkov S. T. Issledovanie datchika polozheniia kolenchatogo vala na osnove kompozitnoi struktury LiNbO3 [Crankshaft position sensor based on the composite structure of LiNbO3] // *Vestnik NovSU*. 2020. 2(118). 36-39. DOI: 10.34680/2076-8052.2020.2(118).36-39
12. Bichurin M., Sokolov O., Ivanov S., Leontiev V., Petrov D., Semenov G., Lobekin V. Physics of Composites for Low-Frequency Magnetoelectric Devices // *Sensors*. 2022. 22(13). 4818. DOI: 10.3390/s22134818

Информация об авторах

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

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

Захаров Максим Анатольевич – доктор физико-математических наук, доцент, профессор, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0000-0002-9144-340X, Maxim.Zakharov@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