

## ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕНСОРОВ НА ОСНОВЕ ПЬЕЗОКЕРАМИКИ ЦТС И МЕТГЛАСА

Бичурин М.И., Петров Р.В., Соловьев И.Н., Соловьев А.Н.

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого», Великий Новгород Великий Новгород, Россия (173003, Великий Новгород, ул. Большая Санкт-Петербургская, д. 41), [Mirza.Bichurin@novsu.ru](mailto:Mirza.Bichurin@novsu.ru)*

Статья посвящена исследованию сенсоров на магнитоэлектрических материалах, которые предназначены для работы в цепях постоянного и переменного тока и фиксируют наличие переменного электромагнитного поля и постоянного магнитного поля. Сенсоры на основе магнитоэлектрических материалов могут найти широкое применение в научных, медицинских и промышленных приборах. Приведён сравнительный анализ различных датчиков магнитных полей. Исследованы характеристики датчика на основе слоистого магнитоэлектрического композита, состоящего из пьезокерамики ЦТС и магнитоэлектрического материала метглас. На частоте 200 Гц коэффициент  $\alpha_E$  достигал  $0,46 \text{ В}\cdot\text{см}^{-1}\cdot\text{Э}^{-1}$ , на частоте 88,22 кГц на частоте резонанса  $\alpha_E$  достигал значения  $3,9 \text{ В}\cdot\text{см}^{-1}\cdot\text{Э}^{-1}$ , для составного датчика коэффициент  $\alpha_E$  достигал величины  $1,28 \text{ В}\cdot\text{см}^{-1}\cdot\text{Э}^{-1}$  на частоте 200 Гц. Показаны направления дальнейших работ для повышения чувствительности магнитоэлектрических сенсоров.

Ключевые слова: магнитоэлектрические материалы, магнитоэлектрические сенсоры, магнитометры.

## MAGNETOELECTRIC MICROWAVE DEVICES FOR PHASED ARRAY

M.I. Bichurin, R.V. Petrov, I.N. Soloviev, A.N. Soloviev

*Novgorod State University, Velikiy Novgorod Velikiy Novgorod, Russia (173003, Velikiy Novgorod, Bolshaiy St-Peterburgskaiy, d.41.) [Mirza.Bichurin@novsu.ru](mailto:Mirza.Bichurin@novsu.ru)*

The article is devoted to the study of sensors on the magnetoelectric materials, which are intended for operation in dc and ac circuits and senses the presence of alternating electromagnetic field and of the constant magnetic field. Sensors on the basis of the magnetoelectric materials may find wide application in scientific, medical and industrial appliances. In paper comparative analysis is given of various sensors of magnetic fields. The characteristics of the sensor on the basis of the glued laminated magnetoelectric composite consisting of piezoceramics of PZT and of magnetostriction material metglas. At a frequency of 200 Hz ratio  $E$  reached  $0.46 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{Oe}^{-1}$ , at a frequency of 88.22 kHz at a frequency of resonance  $E$  reached a value of  $3.9 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{Oe}^{-1}$ , for the composite sensor ratio  $E$  reached the value of  $1.28 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{Oe}^{-1}$  at a frequency of 200 Hz. The directions of the further work to improve the sensitivity of the magnetoelectric sensors shows in this paper.

Keywords: magnetoelectric materials, magnetoelectric sensors, magnetometers.

### Введение

Сенсоры на магнитоэлектрических (МЭ) материалах предназначены для работы в цепях постоянного и переменного тока и фиксируют наличие переменного электромагнитного поля и постоянного магнитного поля [1–6]. Достаточно широкое распространение аналогов МЭ-датчиков, таких как датчики Холла, индукционные катушки, в том числе двойные индукционные катушки (катушки Гельмгольца), SQUID сенсоры

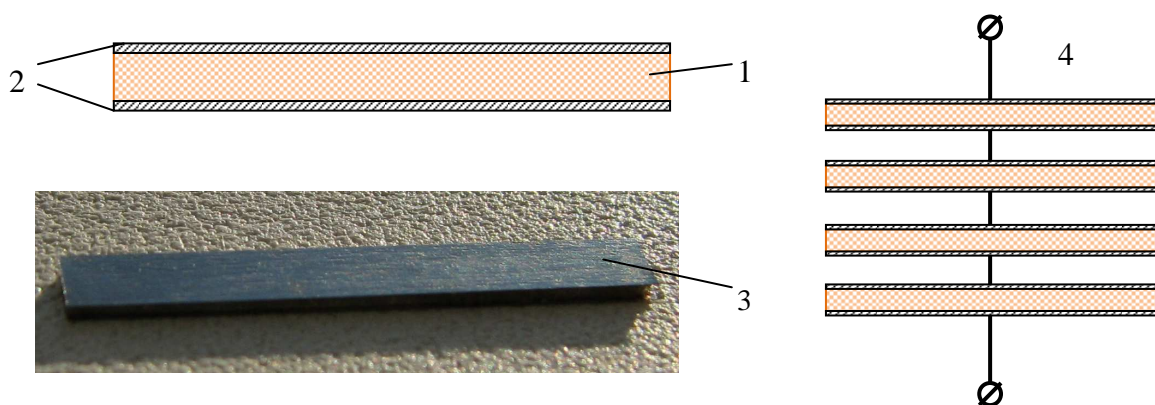


металлах									
5. СКВИД									
6. Датчики на эффекте Холла									
7. Магниторезистивные датчики									
8. Магнитодиоды									
9. Магнитотранзисторы									
10. Волоконно-оптические магнитометры									
11. Магнитооптические датчики									
<b>12. Магнитоэлектрические датчики</b>									

### Конструкция МЭ-датчика

Конструированию МЭ-датчиков и изучению материалов для них посвящено большое количество работ зарубежных авторов, в том числе [7; 8], что свидетельствует о большой актуальности темы и востребованности этих устройств.

Рассмотрим конструкцию МЭ-датчика. Конструкция представляет собой структуру, состоящую из тонкой пластины пьезокерамики ЦТС ( $0.9[\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3]-0.1[\text{Pb}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3+3\text{ mol}\%\text{MnO}_2]$ ) и двух металлических магнитострикционных обкладок из аморфного магнито-мягкого сплава на основе железа – метглас (FeBSiC), рис. 1. Слоёв метгласа может быть в одной обкладке не один, а несколько, в зависимости от необходимой чувствительности.



**Рисунок 1. Конструкция МЭ-датчика:** 1 – ЦТС; 2 – метглас; 3 – МЭ-датчик; 4 – составной МЭ-датчик.

Обкладки метгласа соединялись с ЦТС посредством клеевого соединения. Клей подбирался из соображений технологичности и надёжности. Оптимальным клеем являлся эпоксидный двухкомпонентный быстросохнущий клей. Толщина клеевого соединения

должна по возможности стремиться к минимуму и не превышать нескольких микрон. Толщина клея определяется в основном технологией склеивания. Хорошие результаты показывает технология прессования.

### **Измерительный комплекс**

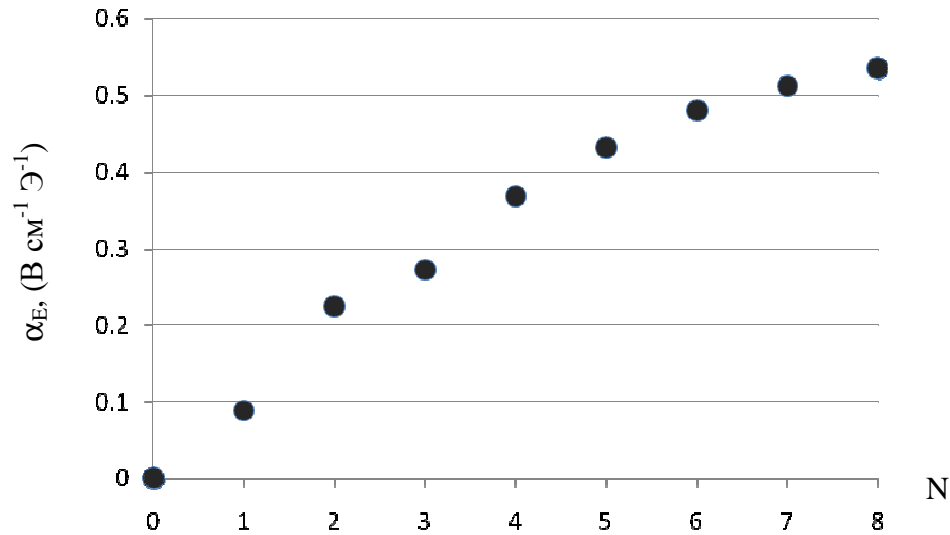
Для измерений магнитоэлектрического коэффициента использовалась установка, которая включала в себя катушки Гельмгольца для создания переменного и постоянного магнитного полей, генератор низкочастотных колебаний, двухлучевой осциллограф, источник постоянного тока, гауссметр. Катушки Гельмгольца создавали переменное магнитное поле величиной до 10 Э и постоянное магнитное поле – до 100 Э. Для создания постоянных сильных магнитных полей также использовался электромагнит и постоянные магниты. Датчик помещался в центр между катушками. Результаты измерений регистрировались на осциллографе. Данные измерений приведены ниже.

### **Измерения**

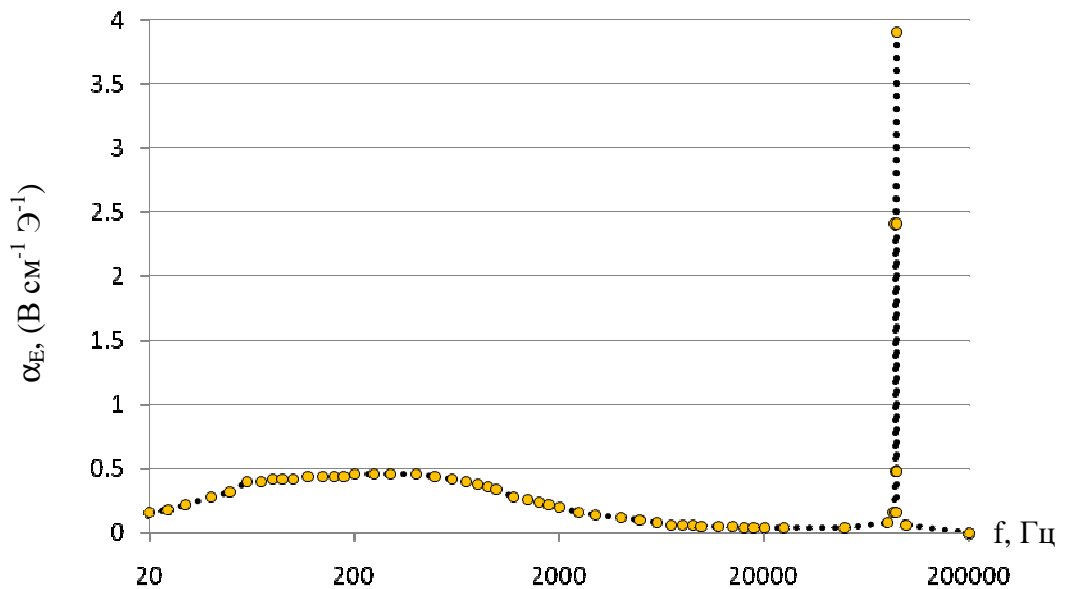
В результате проведённых измерений получены данные, приведённые на рис. 2–5. Исследовался датчик с размерами ЦТС 20x5x0,5 мм, размеры обкладок метгласа 20x5x0,02 мм. Количество слоёв метгласа N варьировалось от 1 до 8 шт., по 4 слоя метгласа на каждую обкладку максимум. На рис. 2 приведены данные зависимости магнитоэлектрического коэффициента  $\alpha_E$  от количества слоёв метгласа в обкладках датчика. Увеличение количества слоёв приводит к росту коэффициента  $\alpha_E$ , стремясь к насыщению уже при шести слоях, после седьмого слоя прирост уже не значителен. Максимальный коэффициент при восьми слоях метгласа достигал  $0,54 \text{ В}\cdot\text{см}^{-1}\cdot\text{Э}^{-1}$ . Рисунок 3 показывает зависимость  $\alpha_E$  в широком диапазоне частот от 20 Гц до 200 кГц для датчика, содержащего по три слоя метгласа в одной обкладке с каждой стороны. Зависимость носит нелинейный характер. На 20 Гц коэффициент  $\alpha_E$  имел величину  $0,16 \text{ В}\cdot\text{см}^{-1}\cdot\text{Э}^{-1}$ , постепенно увеличиваясь и достигая локального максимума на частотах 200–400 Гц в размере  $0,46 \text{ В}\cdot\text{см}^{-1}\cdot\text{Э}^{-1}$ , затем убывая до величины  $0,16 \text{ В}\cdot\text{см}^{-1}\cdot\text{Э}^{-1}$  на частоте 2500 Гц и менее, до  $0,04 \text{ В}\cdot\text{см}^{-1}\cdot\text{Э}^{-1}$  на частоте 16 кГц. Понижение коэффициента на низких частотах обусловлено чувствительностью измерительной аппаратуры. На частоте 88,22 кГц имеется второй максимум  $\alpha_E$ , который обусловлен размерным резонансом в пластине пьезоэлектрика. Пик достигал значения  $3,9 \text{ В}\cdot\text{см}^{-1}\cdot\text{Э}^{-1}$ , превышая значение нерезонансного коэффициента в окрестности максимума в сто раз. Добротность, рассчитанная по формуле

$$Q = \frac{f_0}{f_2 - f_1} \quad , \quad (1)$$

где  $f_0$  – резонансная частота,  $f_1$  и  $f_2$  – частоты, рассчитанные по уровню резонансного напряжения 0.7, даёт значение 550.



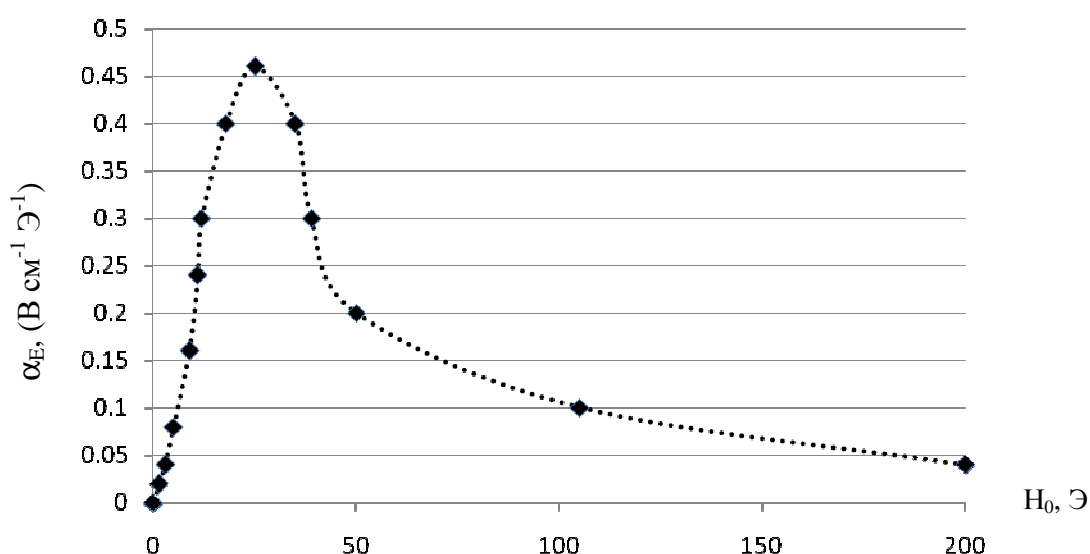
**Рисунок 2. Зависимость  $\alpha_E$  от количества слоёв метгласа.**



**Рисунок 3. Зависимость  $\alpha_E$  от частоты.**

Измерения показали, что при изменении величины переменного магнитного поля изменения коэффициента  $\alpha_E$  не происходит. Рис. 4 демонстрирует зависимость  $\alpha_E$  от

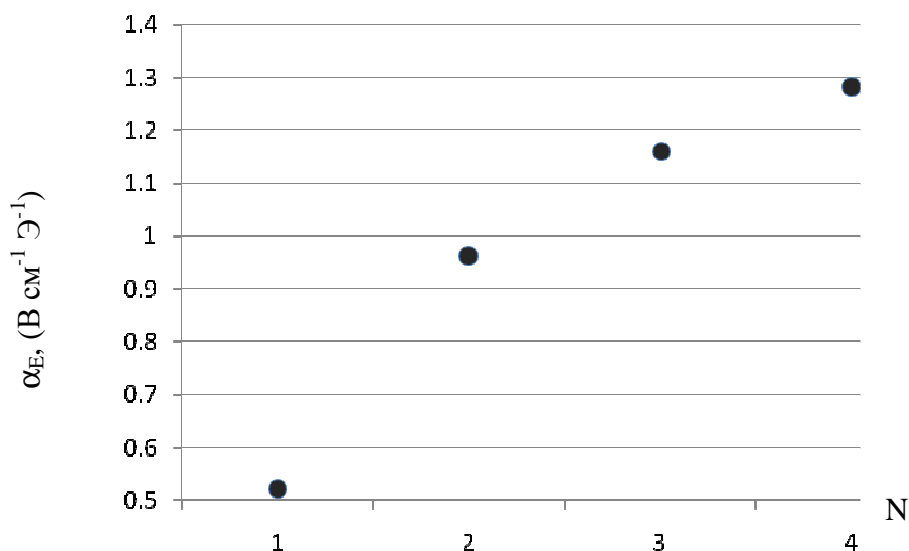
величины постоянного магнитного поля. Для датчика с размерами ЦТС 20x5x0,5 мм, размерами обкладок метгласа 20x5x0,02 мм, количеством слоёв метгласа три на каждую обкладку зависимость имела следующий характер: нулевая чувствительность датчика соответствовала нулевому полю, далее коэффициент  $\alpha_E$  практически линейно повышался при увеличении величины постоянного магнитного поля и достигал 0,46 В·см<sup>-1</sup>·Э<sup>-1</sup> при подмагничивающем поле около 25 Э. В дальнейшем кривая имеет нелинейное снижение, достигая при подмагничивающем поле 200 Э величины 0,04 В·см<sup>-1</sup>·Э<sup>-1</sup>.



**Рисунок 4. Зависимость  $\alpha_E$  от величины постоянного магнитного поля.**

Значительно увеличить чувствительность датчиков можно, соединяя их последовательно в одну цепь, как показано на рис. 1 для составного МЭ-датчика.

На рис. 5. показана зависимость  $\alpha_E$  от количества элементов в датчике. Использовались датчики с размерами ЦТС 20x5x0,5 мм, размерами обкладок метгласа 20x5x0,02 мм, количеством слоёв метгласа четыре на каждую обкладку. Прямого суммирования напряжения на выходе системы не происходит, как это видно на рис. 5. Максимально достижимый коэффициент  $\alpha_E$  достигал 1,28 В·см<sup>-1</sup>·Э<sup>-1</sup>. Это объясняется фазовым сдвигом, равным 45° на каждый элемент составного датчика. Тем не менее с помощью данной схемы удаётся повысить чувствительность прибора практически в два с половиной раза.



**Рисунок 5. Зависимость  $\alpha_E$  от количества элементов в датчике.**

Повышение чувствительности МЭ-сенсоров возможно также применением материалов, имеющих лучшие характеристики, например: используя материалы с большей величиной пьезоэлектрического коэффициента и большей величиной коэффициента магнитострикции, варьируя толщину слоёв и форму сенсора, используя новейшие технологические приёмы производства, уменьшая шумы сенсора, подбирая необходимые режимы работы, проводя точный теоретический расчёт. Усиливая сигналы сенсора и проводя обработку сигнала, также удаётся получить требуемый параметр чувствительности. Расчётные параметры датчиков, проведённые согласно методикам [9] для низкочастотного МЭ-эффекта и [10] для МЭ-эффекта на резонансе, с хорошей точностью подтверждают полученные результаты.

### **Заключение**

Сенсоры на основе МЭ-материалов могут найти широкое применение в научных, медицинских и промышленных приборах. Изученные сенсоры позволяют анализировать постоянные и переменные магнитные поля с высокой чувствительностью. Эксперименты проведённые с МЭ-сенсорами, убедительно доказали возможность создания и применения. На частоте 200 Гц коэффициент  $\alpha_E$  достигал 0,46 В·см<sup>-1</sup>·Э<sup>-1</sup>, на частоте 88,22 кГц на частоте резонанса  $\alpha_E$  достигал значения 3,9 В·см<sup>-1</sup>·Э<sup>-1</sup>, для составного датчика коэффициент  $\alpha_E$  достигал величины 1,28 В·см<sup>-1</sup>·Э<sup>-1</sup> на частоте 200 Гц. Исследованные характеристики магнитоэлектрических сенсоров на основе пьезокерамики ЦТС и метгласа позволяют утверждать, что на их основе возможно построение современных высокочувствительных магнитометров.

## Список литературы

1. Бичурин М.И., Петров Р.В., Килиба Ю.В. Датчики электромагнитного поля // Тезисы 8 Всерос. науч.-техн. конф. «Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления». – М. : МГИЭМ, 1996. – Т. 2. – С. 324.
2. Бичурин М.И., Килиба Ю.В., Петров Р.В. Датчики электромагнитного поля // VIII Всерос. Науч.-техн. конф. : тез. докл. – Н. Новгород : НГТУ, 1996. – Т. 2. – С. 324.
3. Петров Р.В., Килиба Ю.В. Магнитоэлектрические датчики // XXI Гагаринские чтения : тез. докл. – М. : МГАТУ, 1996. – Ч. 3. – С. 148.
4. Бичурин М.И. [и др.]. Методы измерения магнитоэлектрической восприимчивости в композиционных материалах на СВЧ // 2 Всерос. науч.-техн. конф. : тез. докл. – Н. Новгород : НГТУ, 1997. – Ч. 1. – С. 22–23.
5. Petrov R.V., Bichurin M.I., Kiliba Yu.V. Electromagnetic Field Gauges // Sterowanie w Energoelektronice i Napedzie Elektrycznym // tesis, SENE'97 Lodz-Arturowek, 1997 r, s. 74
6. Bichurin M.I., Petrov V.M., Petrov R.V., Kiliba Y.V., Bukashev F.I., Smirnov Yu.V., Eliseev D.N. Magnetolectric Sensor of Magnetic Field // Proceedings of The Fourth Conference On Magnetolectric Internation Phenomena In Crystals (MEIPIC-4) / Ferroelectrics, 2002. – V. 280. – P. 199.
7. Zhai J., Xing Z., Dong S., Li J.F., and Viehland D. Detection of pico-Tesla magnetic fields using magneto-electric sensors at room temperature // Appl. Phys. Letters 88, 062510-1-3 (2006).
8. Equivalent magnetic noise in magnetolectric Metglas/Pb(Mg<sub>1/3</sub>Nb<sub>2/3</sub>)O<sub>3</sub>-PbTiO<sub>3</sub> laminate composites Yaojin Wang, David Gray, David Berry, Junqi Gao, Jiefang Li, D. Viehland and Haosu Luo // Physica status solidi (RRL). – July 2011. – V. 5. – Issue 7. – P. A73–A82, 217–258.
9. Магнитоэлектрический эффект в композиционных материалах / М.И. Бичурин [и др.]. – Великий Новгород, 2005. – 231 с.
10. М.И. Бичурин [и др.]. Электромеханический резонанс в магнитоэлектрических слоистых структурах // ФТТ. – 1975 (2010). – 52.

## Рецензенты:

Захаров А.Ю., д.ф.-м.н., профессор, ФГБОУ ВПО «Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого», г. Великий Новгород.

Корнышев Н.П., д.т.н., ведущий научный сотрудник, НИИ ПТ «РАСТР», г. Великий Новгород.