

ОПТИМИЗАЦИЯ ТОПОЛОГИИ МАГНИТНОЙ КОМПОНЕНТЫ КОМПОЗИЦИОННОЙ СТРУКТУРЫ ДЛЯ АКТИВНЫХ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

С.Н.Иванов, Г.А.Семенов, М.И.Бичурин

TOPOLOGY OPTIMIZATION OF THE MAGNETIC COMPONENT OF THE COMPOSITE STRUCTURE FOR THE ACTIVE MAGNETOELECTRIC DEVICES

S.N.Ivanov, G.A.Semenov, M.I.Bichurin

Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, Gennady.Semenov@novsu.ru

Представлены результаты оптимизации топологии магнитной компоненты трехслойной магнитоэлектрической (МЭ) композиционной структуры с целью повышения чувствительности к магнитному полю активных МЭ приборов на основе магнитоэлектрических-пьезополупроводниковых структур. В качестве магнитных слоев использовался аморфный ферромагнетик — метглас АМАГ 225 в виде пластины размером 28×8 мм, двух полос размером 28×4 мм, четырех полос размером 28×2 мм и восьми полос размером 28×1 мм. Исследование МЭ эффекта проводилось в частотном диапазоне от 1 до 150 кГц и внешнем постоянном магнитном поле H_0 величиной от 0 до 50 Э. С увеличением числа полос до восьми и уменьшением ширины каждой из них до 1 мм наблюдалось увеличение величины МЭ коэффициента по напряжению αE более чем в 2 раза по сравнению со значением, полученным для исходной пластины размером 28×8 мм.

Ключевые слова: магнитоэлектрический (МЭ) эффект, активный МЭ прибор, магнитоэлектрическая-пьезополупроводниковая структура, электромеханический резонанс, магнитоэлектризация, пьезоэлектрический эффект, МЭ коэффициент по напряжению

Для цитирования: Иванов С.Н., Семенов Г.А., Бичурин М.И. Оптимизация топологии магнитной компоненты композиционной структуры для активных магнитоэлектрических приборов // Вестник НовГУ. Сер.: Технические науки. 2020. №5(121). С.17-20. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2020.5\(121\).17-20](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2020.5(121).17-20).

The paper presents the results of the topology optimization of the magnetic component of a three-layer magnetoelectric (ME) composite structure in order to increase the sensitivity to the magnetic field of active ME devices based on magnetostrictive-piezomagnetic structures. An amorphous ferromagnetic metglass AMAG 225 was used as magnetic layers in the form of a 28×8 mm plate, two 28×4 mm strips, four 28×2 mm strips, and eight 28×1 mm strips. The ME effect was studied in the frequency range from 1 to 150 kHz and an external constant magnetic field H_0 of 0 to 50 Oe. With an increase in the number of strips to eight and a decrease in the width of each of them to 1 mm, an increase in the ME voltage coefficient αE was observed by more than 2 times compared to the value obtained for the initial plate size of 28×8 mm.

Keywords: magnetoelectric (ME) effect, active ME devices, magnetostrictive-piezosemiconductors structures, electromechanical resonance, magnetostriction, piezoelectric effect, ME voltage coefficient

For citation: Ivanov S.N., Semenov G.A., Bichurin M.I. Topology optimization of the magnetic component of the composite structure for the active magnetoelectric devices // Vestnik NovSU. Issue: Engineering Sciences. 2020. №5(121). P.17-20. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2020.5\(121\).17-20](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2020.5(121).17-20).

Введение

Возможности современной и перспективной радиоэлектронной аппаратуры напрямую зависят от успехов в области разработки новых материалов с уникальными свойствами. К таким материалам можно отнести мультиферроики — материалы, обладающие одновременно несколькими типами упорядочения, при взаимодействии которых может возникать ряд эффектов, например, таких, как магнитоэлектрический (МЭ) эффект. Под МЭ эффектом понимают возникновение электрической поляризации во внешнем магнитном поле или возникновение намагниченности во внешнем электрическом поле, что может быть использовано для разработки устройств, работающих в широком диапазоне частот [1,2]. По своей чувствительности к магнитному полю (10^{-12} - 10^{-13} Тл, [3]) МЭ устройства вплотную приближаются к СКВИД-магнетометрам.

Известные магниточувствительные полупроводниковые приборы (магниторезисторы, магнитодиоды и магнитотранзисторы), применяемые в автоматике и силовой электронике, имеют ряд существенных недостатков, например, большие значения рабочих магнитных полей и низкую магнитную чувствительность. Перспективными устройствами, лишенными указанных недостатков, являются активные МЭ приборы (МЭ резисторы, диоды, транзисторы [4-8]), в основе работы которых лежит МЭ эффект в магнитоэлектрично-пьезополупроводниковых композиционных структурах [9-13], в первую очередь на основе арсенида галлия и метгласа или никеля [9,10].

В данной работе проводились исследования по оптимизации топологии магнитной компоненты трехслойной композиционной структуры для активных МЭ приборов с целью повышения их чувствительности к магнитному полю.

Конструкция образцов

Исследуемые образцы представляли собой трехслойные магнитоэлектрические композиционные структуры размером $28 \times 8 \times 0,3$ мм, состоящие из двух слоев метгласа марки АМАГ 225 (производитель АО «Мстатор») толщиной 20 мкм каждый, между которыми располагался слой пьезоэлектрического композиционного материала на основе ЦТС (АРС 2705, APC Smart Materials) толщиной 250 мкм. Механическая связь между магнитными слоями и пьезоэлектрическим слоем осуществлялась с помощью клея БФ-2 (см. рис.1).



Рис.1. Конструкция исследуемых образцов

Оптимизация топологии магнитной компоненты заключалась в разрезании исходной пластины метгласа размером (см. рис.2а) на две полосы размером 28×4 мм (см. рис.2б), четыре полосы размером 28×2 мм (см. рис.2в) и восемь полос размером 28×1 мм (см. рис.2г). Полосы нужного размера из метгласа АМАГ 225 изготавливались с помощью лазерной системы LPKF Protolaser U3.

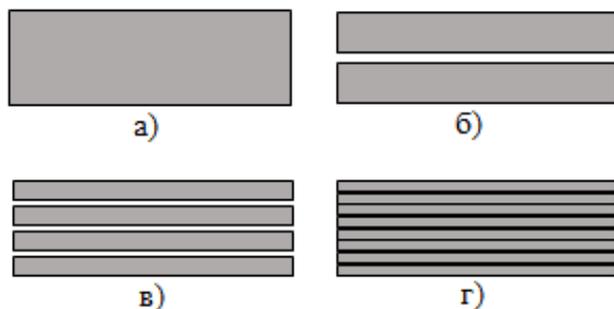


Рис.2. Исследуемые варианты топологии магнитных слоев: а) исходная пластина размером 28×8 мм; б) две полосы размером 28×4 мм; в) четыре полосы размером 28×2 мм; г) восемь полос размером 28×1 мм

Склеивание образцов проводилось с помощью термопресса с давлением порядка 500 кПа при температуре 60°C в течение двух часов. Совмещение полос метгласа с пьезоэлектриком проводилось с помощью оптического микроскопа.

Измерение МЭ эффекта

Измерительная установка состояла из генератора сигналов Nameg HMF-2550, осциллографа НМО722, магнитометра DX-180, системы постоянных магнитов (NdFeB), соленоида и держателя образца (см. рис.3).

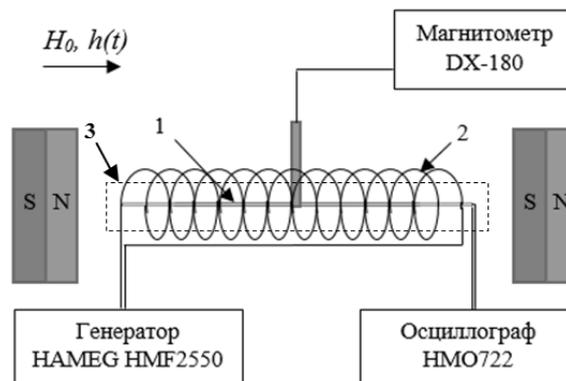


Рис.3. Схема измерительной установки: 1 — образец; 2 — соленоид; 3 — держатель образца

Исследуемый образец в держателе помещался в катушку соленоида и в зазор между магнитами. С помощью системы постоянных магнитов создавалось магнитное поле H_0 величиной от 0 до 50 Э. Векторы магнитных полей H_0 и $h(t)$ направлены вдоль длинной стороны образца (см.рис.3). В катушке соленоида с помощью генератора сигналов создавалось модулирующее переменное магнитное поле $h(t)$ амплитудой порядка 1 Э с частотой от 1 до 150 кГц.

Намагниченный до насыщения внешним постоянным магнитным полем слой метгласа в исследуемом образце, помещенный во внешнее модулирующее переменное поле за счет магнитострикции передает периодические механические деформации пьезоэлектрической компоненте. В результате пьезоэлектрического эффекта на обкладках пьезоэлектрика возникает выходное напряжение, величина которого характеризует величину магнитоэлектрического эффекта.

Результаты измерений

Как видно из графика на рис.4, при одинаковой площади, занимаемой слоями метгласа, более эффективным является деление исходной пластины на полосы возможно меньшего поперечного сечения. С увеличением отношения длины полосы к ее поперечному сечению возрастает магнитострикция, что приводит к увеличению выходного напряжения трехслойной композиционной магнитоэлектрической структуры с 7,92 В для случая исходной пластины размером 28×8 мм до 8,8 В для двух полос размером 28×4 мм, 9,12 В — для четырех полос размером 28×2 мм и 11,84 В — для восьми полос размером 28×1 мм.

Резонансное магнитное поле также уменьшается с величины 3,4 Э для случая исходной пластины размером 28×8 мм до 3,27 Э для двух полос размером 28×4 мм, 2,58 Э — для четырех полос размером 28×2 мм и 2,1 Э — для восьми полос размером 28×1 мм.

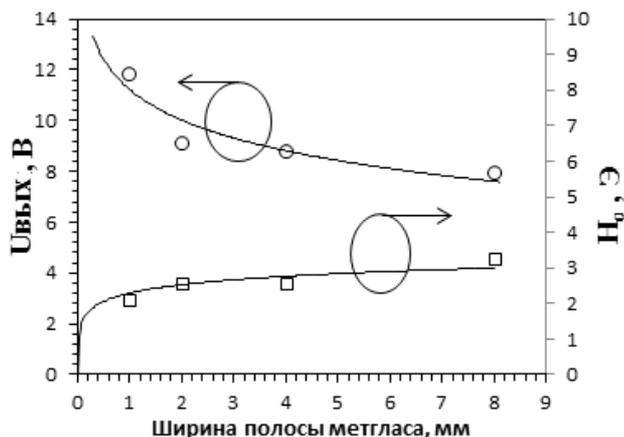


Рис. 4. Влияние ширины полосы слоя метгласа на значение выходного напряжения трехслойной композиционной структуры и величину резонансного магнитного поля

Как видно из графика на рис.5, последовательная оптимизация магнитного слоя метгласа путем разрезания исходной пластины на полосы приводит к существенному росту МЭ коэффициента по напряжению αE со значения 42,03 В/см \cdot Э для исходной пластины размером 28 \times 8 мм до 47,43 В/см \cdot Э для двух полос размером 28 \times 4 мм, 63,34 В/см \cdot Э — для четырех полос размером 28 \times 2 мм и 88,76 В/см \cdot Э — для восьми полос размером 28 \times 1 мм.

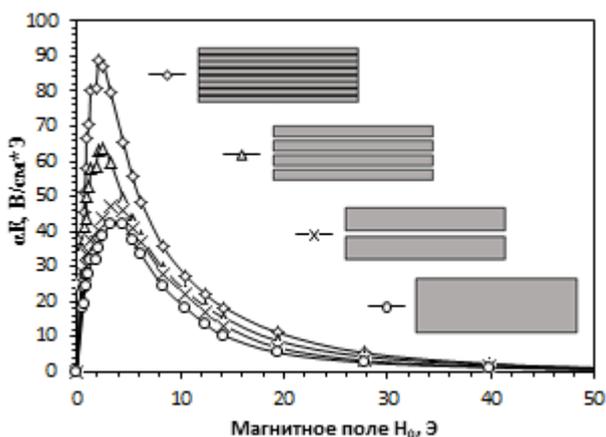


Рис.5. Влияние оптимизации топологии магнитной компоненты (слоев метгласа) на величину МЭ коэффициента по напряжению αE

Таким образом, оптимизация топологии слоев метгласа позволила более чем в два раза увеличить МЭ эффект в трехслойной композиционной структуре по сравнению с исходной прямоугольной пластиной метгласа. В дальнейшем будет проведена оптимизация топологии магнитной компоненты субмиллиметрового поперечного сечения.

Заключение

В работе представлены результаты оптимизации топологии магнитной компоненты трехслойной МЭ композиционной структуры с целью повышения чувствительности к магнитному полю активных МЭ приборов на основе магнитоэлектрических структур.

Оптимизация заключалась в разрезании исходной пластины метгласа АМАГ 225 28 \times 8 \times 0,3 мм на две полосы размером 28 \times 4 мм, четыре полосы размером 28 \times 2 мм и восемь полос размером 28 \times 1 мм. Исследование МЭ эффекта в образцах проводилось в частотном диапазоне от 1 до 150 кГц и внешнем постоянном магнитном поле H_0 величиной от 0 до 50 Э. С увеличением числа полос и уменьшением их поперечного сечения наблюдалось существенное увеличение МЭ эффекта, что обусловлено возрастающей магнитоэлектрической структурой.

Максимальное значение МЭ коэффициента по напряжению αE величиной 88,76 В/см \cdot Э было измерено на частоте электромеханического резонанса $f_p = 61,1$ кГц при значении магнитного поля $H_0 = 2,1$ Э для топологии, состоящей из восьми полос размером 28 \times 1 мм. Данная величина МЭ эффекта более чем в два раза превышает значение, полученное для исходной пластины метгласа размером 28 \times 8 мм.

Эти результаты позволяют улучшить параметры чувствительности к магнитному полю разрабатываемых активных МЭ приборов, используя полосковую топологию магнитной компоненты МЭ композиционной структуры.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 20-07-00168 и 19-07-00391.

1. Bichurin M.I., Petrov V.M., Petrov R.V., Tatarenko A.S. Magnetolectric Composites. Singapore: Pan Stanford Publishing, 2019. 296 p.
2. Nan C.-W., Bichurin M.I., Dong S. et al. Multiferroic magnetolectric composites: Historical perspective, status and future directions // J. Appl. Phys. 2008. V.103. 031101.
3. Turutin A.V., Vidal J.V., Kubasov I.V. et al. Magnetolectric metglas/bidomain y + 140°-cut lithium niobate composite for sensing fT magnetic fields // Appl. Phys. Lett. 2018. V.112 262906. doi: 10.1063/1.5038014.
4. Патент РФ №195270. Магнитоэлектрический диод / С.Н.Иванов, М.И.Бичурин, Г.А.Семенов. Заявл. 25.11.2019. Оpubл. 21.01.2020. Бюл. №3.
5. Патент РФ № 195271. Арсенид-галлиевый магнитоэлектрический диод / С.Н.Иванов, М.И.Бичурин, Г.А.Семенов. Заявл. 25.11.2019. Оpubл. 21.01.2020. Бюл. №3.
6. Заявка на патент № 2020120199 от 11.06.2020.
7. Заявка на патент № 2020120046 от 09.06.2020.
8. Заявка на патент № 2020120029 от 09.06.2020.
9. Laletin V.M., Stognii A.I., Novitskii N.N., Poddubnaya N.N. The magnetolectric effect in structures based on metallized gallium arsenide substrates // Tech. Phys. Lett. 2014. V.40. P.969.
10. Bichurin M.I., Petrov V.M., Leontiev V.S. et al. Magnetolectric effect in layered structures of amorphous ferromagnetic alloy and gallium arsenide // JMMM. 2017. V.424. P.115-117.
11. Karmann S., Helbig R., and Stein R.A. Piezoelectric properties and elastic constants of 4H and 6H SiC at temperatures 4–320 K // JAP. 1989. V.66. P.3922. doi: 10.1063/1.344477.
12. Faramehr S., Jankovic N. and Igic P. Analysis of GaN MagHEMTs // Semicond. Sci. Technol. 2018. Vol.33. Issue 9. 095015.
13. Greve H., Woltermann E., Quenzer H.-J., et al. Giant magnetolectric coefficients in (Fe90Co10)78Si12B10 - AlN thin film composites // Appl. Phys. Lett. 2010. V.96. 182501.

References

1. Bichurin M.I., Petrov V.M., Petrov R.V., Tatarenko A.S. *Magnetolectric Composites*. Pan Stanford Publishing. Singapore, 2019, 296 p.
2. Ce-Wen Nan, Bichurin M. I., Shuxiang Dong, D. Viehland, G. Srinivasan. Multiferroic magnetolectric composites: Historical perspective, status and future directions. *J. Appl. Phys.*, 2008, vol. 103, p. 031101.
3. Turutin A.V., Vidal J.V., Kubasov I.V. et al. Magnetolectric metglas/bidomain $\gamma + 140^\circ$ -cut lithium niobate composite for sensing fT magnetic fields. *Appl. Phys. Lett.* 2018, vol. 112, p. 262906. doi: 10.1063/1.5038014.
4. Ivanov S.N., Bichurin M.I., Semenov G.A. Magnitoelectriceskii diod [Magnetolectric diode]. Patent RF no. 195270, 2020.
5. Ivanov S.N., Bichurin M.I., Semenov G.A. Arsenid-gallievyy magnitoelectriceskii diod [Arsenid-gallium magnetolectric diode]. Patent RF no. 195271, 2020.
6. A patent application no. 2020120029. Filing date: 09.06.2020.
7. A patent application no. 2020120046. Filing date: 09.06.2020.
8. A patent application no. 2020120199. Filing date: 11.06.2020.
9. Laletin V.M., Stognii A.I., Novitskii N.N. et al. The magnetolectric effect in structures based on metallized gallium arsenide substrates. *Tech. Phys. Lett.*, 2014, vol. 40, p. 969.
10. Bichurin M.I., Petrov V.M., Leontiev V.S. et al. Magnetolectric effect in layered structures of amorphous ferromagnetic alloy and gallium arsenide. *JMMM*, 2017, vol. 424, pp.115–117.
11. Karmann S., Helbig R., Stein R. A. Piezoelectric properties and elastic constants of 4H and 6H SiC at temperatures 4–320 K. *JAP* 66, 1989, v.66, iss.8, p.3922. doi: 10.1063/1.344477.
12. Faramehr S., Jankovic N., Igc P. Analysis of GaN MagHEMTs. *Semicond. Sci. Technol.*, 2018, vol. 33, iss. 9, p. 095015.
13. Greve H., Woltermann E., Quenzer H.-J. et al. Giant magnetolectric coefficients in $(\text{Fe}_{90}\text{Co}_{10})_{78}\text{Si}_{12}\text{B}_{10}$ - AlN thin film composites. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, vol.96, iss.18, p.182501.