



---

**ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА В  
МУЛЬТИФЕРРОИКОВОЙ СЛОИСТОЙ СТРУКТУРЕ  
Метглас/GaAs/Метглас ДЛЯ ДАТЧИКОВ ПОЛОЖЕНИЯ**

*Евгений В. Кузьмин, Роман В. Петров, Виктор С. Леонтьев, Дарья Я. Бурцева,  
Мирза И. Бичурин*  
[roman.petrov@novsu.ru](mailto:roman.petrov@novsu.ru)

*Институт электронных и информационных систем, Новгородский  
государственный университет, 173003 Великий Новгород,  
РОССИЯ*

*Алёна Р. Петрова*  
[a.r.petrova@yandex.ru](mailto:a.r.petrova@yandex.ru)

*Московский авиационный институт, 125993 Москва,  
РОССИЯ*

*Андрей В. Желаннов*  
[zhelannovav@okbplaneta.ru](mailto:zhelannovav@okbplaneta.ru)

*АО «ОКБ-Планета», 173000 Великий Новгород,  
РОССИЯ*

*Славчо Т. Божков, Иван К. Миленов*  
[stbozhkov@vtu.bg](mailto:stbozhkov@vtu.bg), [milenov55@abv.bg](mailto:milenov55@abv.bg)

*Факультет “Техника и строительные технологии на транспорте”  
Факультет “Коммуникации и электрооборудование на транспорте”  
Университет транспорта имени Тодора Каблешкова, ул. Гео Милев 158, 1574  
София  
БОЛГАРИЯ*

*Пенко Т. Божков*  
[stbozhkov@vtu.bg](mailto:stbozhkov@vtu.bg)

*Olimex Ltd, Пловдив  
БОЛГАРИЯ*

**Ключевые слова:** магнитоэлектрический эффект, мультиферроиковая слоистая структура, датчик положения

**Абстракт:** в данной статье представлены результаты исследований магнитоэлектрического эффекта в мультиферроиковой слоистой структуре

*Метглас/GaAs/Метглас на основе полупроводникового материала GaAs и магнитоэлектрического сплава Метглас. Экспериментально была исследована магнитоэлектрическая структура Метглас/GaAs/Метглас с размерами 20x5x0,64 мм. В статье также приводится теоретическое исследование измеряемой структуры. Все измерения проводились по отработанным ранее методикам на измерительном стенде. Приводятся выходные характеристики. При постоянном поле подмагничивания 30 Гс, величина магнитоэлектрического коэффициента в структуре Метглас/GaAs/Метглас достигала значения  $\alpha_{ME}=25$  V/cm Oe на частоте электромеханического резонанса  $f_{рез}=480,2$  kHz. В заключительной части статьи идет обсуждение перспектив возможного практического применения данных магнитоэлектрических структур в датчиках положения.*

## **ВВЕДЕНИЕ**

Совершенствование датчиков положения — это актуальная проблематика автоматических устройств, робототехники, автомобилестроения и пр. Применение новых материалов, в том числе таких как мультиферроиковые слоистые структуры с магнитоэлектрическим (МЭ) эффектом, — задача для исследовательских и инженерных работ. За последнее десятилетие МЭ структуры и устройства на их основе стали важной темой исследований. Проводятся всесторонние исследования различных МЭ материалов и их комбинаций для поиска оптимальных МЭ структур. Существующие МЭ композиты уже позволяют разрабатывать различные устройства на основе МЭ эффекта, например, датчики магнитного поля, датчики тока, датчики положения. Такие устройства также могут найти применение в медицине и других областях народного хозяйства. Двухфазные магнитоэлектрично-пьезоэлектрические структуры позволяют создавать МЭ связь, которая заключается в индуцировании электрического потенциала, в приложенном переменном и постоянном магнитном поле. Этот эффект является следствием механического взаимодействия магнитоэлектрических и пьезоэлектрических фаз [1-3]. МЭ эффект заключается в возникновении в материале электрической поляризации  $\delta P$  под действием внешнего магнитного поля  $\delta H$ . МЭ восприимчивость, равная произведению МЭ коэффициента по напряжению на диэлектрическую проницаемость  $\alpha = \alpha_E \cdot \varepsilon = \delta P / \delta H$ , характеризует величину МЭ эффекта. Количественно МЭ эффект характеризуется МЭ коэффициентом по напряжению  $\alpha_E$ , равным отношению индуцированного переменного электрического поля к приложенному магнитному переменному полю в условиях разомкнутой электрической цепи. Величина коэффициента определяется геометрическими, магнитными, диэлектрическими и механическими параметрами составляющих её компонентов и частотой магнитного поля [3-5].

Использование пьезоэлектрических материалов позволяет достичь более высоких значений МЭ коэффициента по напряжению благодаря большому значению пьезоэлектрического коэффициента  $d$ . Однако с практической точки зрения для функциональных электронных устройств композитные материалы и конструкции на основе сегнетоэлектриков имеют недостатки, которые включают в себя значительные потери гистерезиса, пьезоэлектрические эффекты и температурную зависимость параметров. Монокристаллические пьезоэлектрики могут иметь высокие значения коэффициента электромеханической связи. Частота электромеханического резонанса (ЭМР) не зависит от температуры. МЭ коэффициент в слоистых структурах определяется соотношением  $d/\varepsilon$ , где  $\varepsilon$  - диэлектрическая проницаемость пьезоэлектрической фазы. Поэтому монокристаллические пьезоэлектрики с высоким значением отношения  $d/\varepsilon$ , сравнимые с таковыми для традиционных пьезоэлектрических материалов, в последнее время интенсивно изучаются. Для тяжёлых производственных

условий эксплуатации и хорошей технологичности изделий важно иметь высокую повторяемость характеристик изготавливаемых датчиков положения. Для этого идеально подходят монокристаллические полупроводниковые структуры типа GaAs с известными и хорошо изученными свойствами, в отличие от, например, пьезокерамики типа ЦТС с большим температурным дрейфом. Следует отметить также, что стоимость арсенида галлия ниже чем, например, ниобата лития или AlGaN/GaN структур, что влияет на конечную стоимость изготовления датчиков.

Целью настоящей статьи является исследование магнитоэлектрического эффекта в полупроводниковых структурах Метглас/GaAs/Метглас, предназначенных для применения в датчиках положения, в том числе в датчиках положения коленчатого вала автомобилей.

## ИССЛЕДУЕМЫЕ СТРУКТУРЫ

В данной работе исследовались слоистые структуры, состоящие из полупроводниковых пьезоэлектрических материалов GaAs [001] толщиной 0,5 мм с размерами 25x5 мм и обкладок Метгласа толщиной 23 мкм с размерами 25(30)x5 мм, которые одновременно служат электродами. Пластины Метгласа соединялись с полупроводниковым материалом GaAs посредством клея, толщина клеевого слоя при этом не превышала 1 мкм. С каждой стороны образца были приклеены по 3 пластины Метгласа. Внешняя пластина на 5 мм длиннее, для пайки выводов. Конструкция исследуемых МЭ элементов Метглас/GaAs/Метглас приведена на рисунке 1.

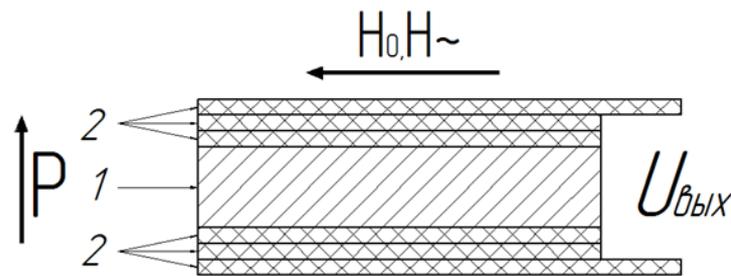


Рис. 1 – Конструкция исследуемых МЭ элементов Метглас/GaAs/Метглас

Стрелками указано направление постоянного и переменного магнитных полей и направление поляризации.

## ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Методика расчёта МЭ структуры аналогична приведённой в статье [6]. Известно, что величина МЭ коэффициента напряжения для слоистой структуры определяется произведением пьезоэлектрического и пьезомагнитного коэффициентов, пьезоэлектрического и магнитострикционного слоев соответственно. Симметрия кристаллической структуры арсенида галлия  $\bar{4}3m$ . Для кристаллов с заданной симметрией пьезоэлектрический тензор имеет только один независимый ненулевой компонент,  $d_{14} = d_{25} = d_{36}$ . Приложенное электрическое поле вдоль кристаллографических осей [100], [010] или [001] вызывает сдвиговые деформации образца. Однако электрическое поле, приложенное вдоль оси [111] к пластине (111), вызывает большую продольную деформацию, поскольку продольные пьезоэлектрические коэффициенты вдоль оси [111], по закону преобразования пьезоэлектрического тензора, не равны нулю [7]:

$$(1) d_{i'j'k'} = \beta_{i'l} \beta_{j'm} \beta_{k'n} d_{lmn}$$

где  $\beta$  - направляющая косинусная матрица для осей  $1', 2', 3'$  относительно кристаллографических осей  $1, 2, 3$ . В частности, продольный пьезоэлектрический коэффициент для оси  $[111]$  оценивается как:

$$(2) d_{3'3'} = \frac{d_{14}}{\sqrt{3}}$$

Из-за сложности изготовления образцов (111) мы исследуем пластины арсенида галлия (001), которые вырезаются параллельно естественным граням. Предполагается, что образец представляет собой тонкую узкую пластину с длиной  $L$ , шириной  $b$  и толщиной  $t_p$ , которая удовлетворяет условию  $t_p \ll b \ll L$ . Внешнее электрическое поле прикладывается вдоль направления  $[100]$ , параллельного оси  $1'$ . Ось  $3'$  направлена вдоль длины образца, а угол между  $3'$  и  $[001]$  обозначен как  $\theta$ . В этом случае единственным ненулевым компонентом напряжения является  $T_{3'3'}$ . Тогда можно использовать одномерную модель механических деформаций. Направляющая косинусная матрица для осей  $1', 2', 3'$  относительно кристаллографических осей  $1, 2, 3$  задается как:

$$(3) \beta = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix}.$$

Согласно закону упругости, электрическое поле, приложенное к пьезоэлектрическому слою вдоль  $1'$ , вызывает деформацию:

$$(4) S_{3'3'} = d_{1'3'} E_{1'} + {}^p s_{3'3'} T_{3'3'}$$

где  ${}^p s_{3'3'}$  и  ${}^p T_{3'3'}$  - коэффициент податливости и напряжение пьезоэлектрического слоя.

Пьезоэлектрический коэффициент  $d_{1'3'}$  может быть выражен через начальный коэффициент  $d_{14}$  в соответствии с формулой (1). Подстановка уравнения (2) в уравнение (1) дает:

$$(5) d_{1'3'} = \sin(2\theta) d_{14} / 2$$

Коэффициенты податливости могут быть преобразованы аналогично пьезоэлектрическим коэффициентам:

$$(6) s_{i'j'k'p'} = \beta_{i'l} \beta_{j'm} \beta_{k'n} \beta_{u'u} s_{lmmu}$$

Получаем:

$$(7) {}^p s_{33'} = \left(1 - \frac{1}{2} \sin^2(2\theta)\right) {}^p s_{11}^0 + \frac{1}{4} \sin^2(2\theta) ({}^p s_{44}^0 + 2 {}^p s_{12}^0)$$

Чтобы получить выражение для МЭ коэффициента по напряжению, необходимо найти деформацию пьезоэлектрического слоя на основе решения уравнений движения для слоистой структуры магнитострикционно-пьезоэлектрического типа:

$$(8) \bar{\rho} \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = V \frac{\partial^p T_{ij}}{\partial x_j} + (1-V) \frac{\partial^m T_{ij}}{\partial x_j}$$

где  $u_i$ ,  $V$ ,  ${}^p T_{ij}$ ,  ${}^m T_{ij}$  и  $\bar{\rho} = V {}^p \rho + (1-V) {}^m \rho$  - смещение, объемная доля пьезоэлемента, компоненты напряжений пьезоэлектрического и ферромагнитного слоев и средняя плотность слоистой структуры соответственно, при этом  ${}^p \rho$ ,  ${}^m \rho$  обозначает плотность пьезоэлектрического и ферромагнитного слоев. Граничные условия заключаются в приравнивании к нулю полной силы, действующей на образец на концах конструкции. Выражение для коэффициента напряжения МЭ получается путем подстановки найденной составляющей напряжения в состояние разомкнутой электрической цепи:

$$(9) \alpha_E = \frac{2dq \operatorname{tg}(kL/2)}{\varepsilon(rs_m + s_p)kL}$$

где  $k = \omega \sqrt{\rho \left[ \frac{V}{p s_{11}} + \frac{1-V}{m s_{11}} \right]^{-1}}$  и  $r = t_p/t_m \cdot t_p$  и  $t_m$ , обозначают толщину пьезоэлектрического и ферромагнитного слоев соответственно.

## ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ СТЕНД

Измерения проводились на измерительном стенде, включающем в себя генератор сигналов Nameg НМF2550, постоянный магнит, катушку индуктивности, осциллограф Nameg НМО722 и магнитометр. Стенд работает следующим образом: на соленоид подается сигнал генератора, который создает переменное магнитное поле  $H \sim$  величиной в 1 Э. Далее, постоянным магнитом создаётся постоянное магнитное поле, которое составляет 30 Э. В результате воздействия постоянного и переменного магнитных полей, в следствии поперечного МЭ эффекта, на обкладках МЭ элемента индуцируется электрический сигнал, который фиксируется осциллографом.

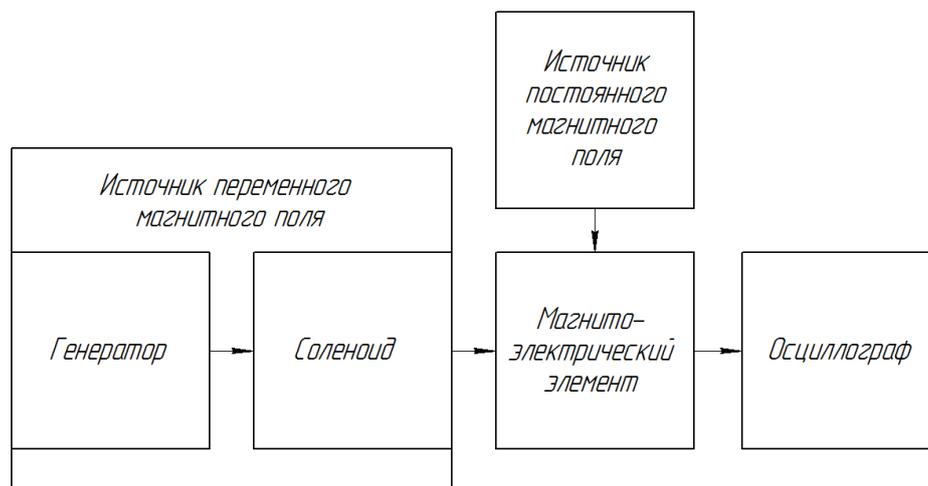


Рис. 2 – Структурная схема измерительного стенда

Измеренные значения МЭ коэффициента по напряжению показаны на рис. 3.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Для проведения экспериментальных исследований были подготовлены следующие магнитоэлектрические слоистые структуры с использованием полупроводникового материала Метглас/GaAs/Метглас, с размером 20x5x0,64мм. Пластины GaAs производства Xiamen Compound Semiconductor Wafers (Китай), Метглас АМАG 492 ПАО «МСТАТОР» (Россия). Измерения проводились по ранее отработанной методике [8].

Измерения проводились на стенде (рис. 2). Экспериментальные образцы помещались в соленоидальную катушку. Далее подавалось постоянное магнитное поле. В результате воздействия постоянного и переменного магнитных полей на композитную структуру наблюдался прямой МЭ эффект. Затем значение выходного сигнала фиксировалось на осциллографе. Исследуемые образцы были свободно расположены внутри измерительной соленоидальной катушки.

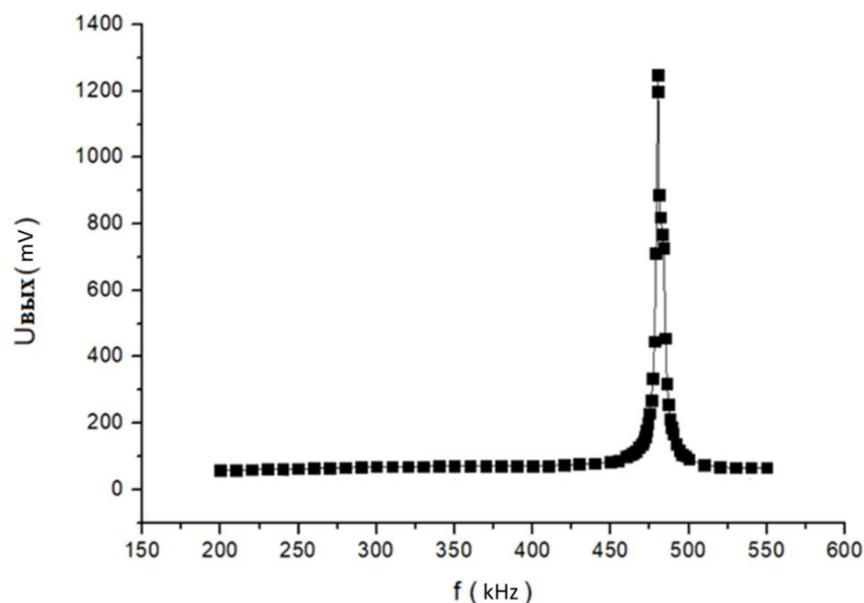


Рис. 3 – График зависимости выходного напряжения от частоты в исследуемых структурах

Из представленного выше рис.3 видно, что резонансная частота исследуемой структуры Метглас/GaAs/Метглас составила 480,2 kHz, значение выходного отклика достигло около 1,25 V, величина МЭ коэффициента по напряжению составила около 25 V/cm Oe.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Было проведено экспериментальное исследование магнитоэлектрического эффекта в мультиферроиковой слоистой структуре на основе полупроводника арсенид галлия Метглас/GaAs/Метглас. Получена зависимость выходного напряжения структуры от частоты. В исследованной структуре на основе Метглас/GaAs/Метглас значение МЭ коэффициента по напряжению составило  $\alpha_{ME} = 25 \text{ V/cm Oe}$ , на частоте ЭМР  $f_{рез} = 480,2 \text{ kHz}$ . Основная область применения полупроводниковых материалов - микроэлектроника. МЭ структуры на основе полупроводниковых материалов можно использовать для создания пассивных элементов и высокочувствительных датчиков, например, датчиков положения чувствительных к магнитному полю. Также исследованный МЭ материал может быть использован в интегральных микросхемах. Величина полученного эффекта достаточна для использования в МЭ датчиках положения.

Статья посвящена реализации проекта "Моделирование и разработка датчиков положения основанных на мультиферроиковых слоистых структурах" по контракту № КП-06-Русия/20 от 28.09.2019 г., Софийский университет транспорта им. Тодора Каблешкова, с болгарской стороны. С российской стороны исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-58-18001 Болг\_а.

## Литература

- [1]. M.I. Bichurin, V.M. Petrov, and G. Srinivasan. Modeling of magnetoelectric effect in ferromagnetic/piezoelectric multilayer composites // Ferroelectrics, vol. 280, pp. 165–175, 2002.

- [2]. M.I. Bichurin, V.M. Petrov, and G. Srinivasan. Theory of low-frequency magnetoelectric effects in ferromagnetic-ferroelectric layered composites // *Journal of Applied Physics*, vol. 92, no. 12, pp. 7681–7683, 2002.
- [3]. *Magnetoelectricity in Composites* // Eds. M. Bichurin and D. Viehland / Pan Stanford Publishing, Singapore 2011. – 286 p.
- [4]. Бичурин М.И., Петров Р.В., Соловьев И.Н., Соловьев А.Н. Исследование магнитоэлектрических сенсоров на основе пьезокерамики ЦТС и Метгласа // *Современные проблемы науки и образования*. – 2012. – № 1; URL: [www.science-education.ru/101-5367](http://www.science-education.ru/101-5367). Дата обращения: 5.02.2015
- [5]. Петров В.М., Бичурин М.И. Магнитоэлектрический эффект в симметричных и асимметричных магнитострикционно-пьезоэлектрических слоистых структурах // *Современные проблемы науки и образования*. – 2013. – № 4; URL: [www.science-education.ru/110-9602](http://www.science-education.ru/110-9602). Дата обращения: 5.02.2015.
- [6]. M.I. Bichurin, V.M. Petrov, V.S. Leontiev, S.N. Ivanov, O.V. Sokolov Magnetoelectric effect in layered structures of amorphous ferromagnetic alloy and gallium arsenide // *JMMM* 424 (2017) 115-117. doi.org/10.1016/j.jmmm.2016.10.054
- [7]. D.L. Smith. Strain-generated electric fields in [111] growth axis strained-layer superlattices. *Solid State Commun.* 57, 919 (1986).
- [8]. V. M. Petrov, M. I. Bichurin, K. V. Lavrentyeva, V. S. Leontiev Enhanced Magnetoelectric Coupling in Layered Structure of Piezoelectric Bimorph and Metallic Alloy // *Journal of Electronic Materials*, 2016, Volume 45, Issue 8, pp 4197–4201. DOI: 10.1007/s11664-016-4628-9

## **RESEARCH of MAGNETOELECTRIC EFFECT in MULTIFERROIC LAYERED STRUCTURE of Metglas/GaAs/Metglas for POSITION SENSORS**

**Evgeniy V. Kuzmin, Roman V. Petrov, Viktor S. Leontiev, Daria Y. Burtseva, Mirza I.  
Bichurin**

roman.petrov@novsu.ru

*Institute of Electronic and Information Systems, Novgorod State University, 173003 Veliky  
Novgorod,  
RUSSIA*

**Alena R. Petrova**

a.r.petrova@yandex.ru

*Moscow Aviation Institute, 125993 Moscow,  
RUSSIA*

**Andrey V. Zhelannov**

zhelannovav@okbplaneta.ru

**JSC “OKB-Planeta”, 173000 Veliky Novgorod,  
RUSSIA**

**Slavcho T. Bozhkov, Ivan K. Milenov**  
stbozhkov@vtu.bg, milenov55@abv.bg

**Department of Transport Equipment, Department of Electrical Equipment in Railway  
Transport,  
Todor Kableskov University of Transport  
Sofia, 158 Geo Milev Str.  
THE REPUBLIC OF BULGARIA**

**Penko T. Bozhkov**  
stbozhkov@vtu.bg

**Olimex Ltd, Plovdiv,  
BULGARIA**

**Keywords:** *magnetoelectric effect, multiferroic layered structure, position sensor.*

**Abstract:** *The paper is devoted to the study of the magnetoelectric effect in the multiferroic layered structure of Metglas/GaAs/Metglas based on GaAs semiconductor material and Metglas magnetostrictive alloy. A magnetoelectric structure of Metglas/GaAs/Metglas with dimensions of 20x5x0.64 mm was experimentally studied. The article also provides a theoretical study of the measured structure. All measurements were performed according to previously worked out methods on the measuring stand. Output characteristics are given. The value of the magnetoelectric coefficient in the Metglas/GaAs/Metglas structure reached the value  $\alpha_{ME}=25$  V/(cm·Oe) at the electromechanical resonance frequency 480.2 kHz with bias field 30 G. The final part of the article discusses the prospects for possible practical application of these magnetoelectric structures in position sensors.*