

# МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ. МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

MATERIALS SCIENCE AND TECHNOLOGY. MAGNETIC MATERIALS

Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2023. Т. 26, № 1. С. 26—35.  
DOI: 10.17073/1609-3577-2023-1-26-35

УДК 621.315; 537.9

## Магнитоэлектрический эффект в трехслойных градиентных композитах $\text{LiNbO}_3/\text{Ni}$ /метглас

© 2023 г. В. В. Куц<sup>1</sup>✉, А. В. Турутин<sup>1</sup>, А. М. Кислюк<sup>1</sup>, И. В. Кубасов<sup>1</sup>,  
Р. Н. Жуков<sup>1</sup>, А. А. Темиров<sup>1</sup>, М. Д. Малинкович<sup>1</sup>,  
Н. А. Соболев<sup>1,2</sup>, Ю. Н. Пархоменко<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> *Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»,  
Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Москва, 119049, Российская Федерация*

<sup>2</sup> *Университет Авейру, 3810–193 Авейру, Португалия*

<sup>3</sup> *АО «Государственный научно–исследовательский и проектный институт  
редкометаллической промышленности «Гиредмет»,  
Электродная ул., д. 2, стр. 1, Москва, 111524, Российская Федерация*

✉ Автор для переписки: viktor.kuts.3228@yandex.ru

**Аннотация.** Исследовано влияние отжига в постоянном магнитном поле на величину магнитоэлектрического (МЭ) коэффициента в трехслойных градиентных МЭ композитах  $\text{LiNbO}_3/\text{Ni}$ /метглас. Продемонстрирована методика электрохимического осаждения никеля на бидоменные кристаллы ниобата лития. Показано, что оптимальная для формирования максимальной остаточной намагниченности слоя Ni температура отжига в постоянном магнитном поле составляет 350 °С. В образцах, отожженных при данной температуре, был достигнут максимальный сдвиг зависимости МЭ коэффициента от напряженности внешнего постоянного магнитного поля относительно значения  $H_{dc} = 0$ . Значение квазистатического МЭ коэффициента в отсутствие внешнего постоянного магнитного поля составило 1,2 В/(см · Э). Максимальное значение МЭ коэффициента было достигнуто на частоте изгибного резонанса структуры 278 Гц и составило 199,3 В/(см · Э) без приложения внешнего магнитного поля. Полученные в работе значения МЭ коэффициента в трехслойных градиентных композитах  $\text{LiNbO}_3/\text{Ni}$ /метглас не уступают аналогичным значениям для большинства МЭ композитных материалов, опубликованных ранее.

**Ключевые слова:** магнитоэлектрический эффект, композитные структуры, подмагничивающий слой, бидоменный ниобат лития, метглас, никель

**Благодарности:** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22–19–00808, <https://rscf.ru/project/22-19-00808/>

**Для цитирования:** Куц В.В., Турутин А.В., Кислюк А.М., Кубасов И.В., Жуков Р.Н., Темиров А.А., Малинкович М.Д., Соболев Н.А., Пархоменко Ю.Н. Магнитоэлектрический эффект в трехслойных градиентных композитах  $\text{LiNbO}_3/\text{Ni}$ /метглас. *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники.* 2023; 26(1): 26—35. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2023-1-26-35>

# Magnetoelectric effect in trilayered gradient composites $\text{LiNbO}_3/\text{Ni}/\text{Metglas}$

V. V. Kuts<sup>1</sup>✉, A. V. Turutin<sup>1</sup>, A. M. Kislyuk<sup>1</sup>, I. V. Kubasov<sup>1</sup>, R. N. Zhukov<sup>1</sup>,  
A. A. Temirov<sup>1</sup>, M. D. Malinkovich<sup>1</sup>, N. A. Sobolev<sup>1,2</sup>, Yu. N. Parkhomenko<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> *National University of Science and Technology MISIS,  
4–1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation*

<sup>2</sup> *Department of Physics and I3N, University of Aveiro, 3810–193 Aveiro, Portugal*

<sup>3</sup> *Federal State Research and Development Institute of Rare Metal Industry (Giredmet JSC),  
2–1 Elektrodnyaya Str., Moscow 111524, Russian Federation*

✉ Corresponding author: viktor.kuts.3228@yandex.ru

**Abstract.** In this work the effect of annealing in a constant magnetic field on the magnetoelectric (ME) coefficient in three-layered gradient composites  $\langle \text{LiNbO}_3/\text{Ni}/\text{Metglas} \rangle$  is investigated. A technique of nickel electrochemical deposition on bidomain lithium niobate crystals was demonstrated. It is shown that the optimum temperature for the formation of the maximum remanent magnetization of the Ni layer in a constant magnetic field is 350 °C. In the samples annealed at this temperature, the maximum shift of the dependence of the ME coefficient on the external constant magnetic field relative to the value of 0 Oe was achieved. Quasistatic ME coefficient value was 1.2 V/(cm · Oe) without applying of external DC magnetic field. The maximum value of the ME coefficient was reached 199.3 V/(cm · Oe) at bending resonance of 278 Hz without external DC magnetic field. Obtained in this work values of ME coefficients don't yield to most of ME composite materials which were published before.

**Keywords:** magnetoelectric effect, composite structures, magnetising layer, bidomain lithium niobate, metglas, nickel

**Acknowledgments:** The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 22–19–00808, <https://rscf.ru/project/22-19-00808/>

**For citation:** Kuts V.V., Turutin A.V., Kislyuk A.M., Kubasov I.V., Zhukov R.N., Temirov A.A., Malinkovich M.D., Sobolev N.A., Parkhomenko Yu.N. Magnetoelectric effect in trilayered gradient composites  $\text{LiNbO}_3/\text{Ni}/\text{Metglas}$ . *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki = Materials of Electronics Engineering*. 2023; 26(1): 26–35. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2023-1-26-35>

## Введение

Магнитоэлектрический (МЭ) эффект заключается в изменении поляризации материала под воздействием внешнего магнитного поля (прямой эффект) или изменении намагниченности материала в присутствии электрического поля (обратный эффект) [1]. Интерес к композитным МЭ материалам связан с возможностью изготовления на их основе целого ряда устройств, обладающих уникальными свойствами, таких как, например, микроволновые фазовращатели, электронно–настраиваемые СВЧ–резонаторы и линии задержки, системы сбора

бросовой тепловой энергии, магнитоэлектрическая энергонезависимая память, микромеханические магнитоэлектрические антенны, магнитоэлектрические гираторы и сверхчувствительные сенсоры магнитных полей [2–6].

Наибольшее значение МЭ коэффициента наблюдается в композитных структурах, состоящих из последовательных слоев пьезоэлектрических и магнитоэлектрических материалов [7]. МЭ композиты, в которых на пьезоэлектрические материалы различными способами (магнетронное напыление, электрохимическое осаждение, приклеивание с помощью эпоксидной смолы) наносятся аморфные

металлы (метглас), обладают наибольшими значениями МЭ коэффициента [7]. Для достижения максимального МЭ коэффициента (рабочей точки) такие структуры требуют приложения внешнего постоянного подмагничивающего поля. Это связано с тем, что пьезомагнитный коэффициент ( $q$ ) нелинейно зависит от магнитного поля с максимумом при некотором оптимальном значении. Обычно внешнее подмагничивающее поле прикладывается при помощи соленоидов, катушек Гельмгольца или постоянных магнитов, расположенных на определенном расстоянии от МЭ образца. Необходимость подавать внешнее магнитное поле для эффективной работы МЭ композитов является существенным недостатком этих материалов вследствие увеличения размеров устройств.

В литературе описано несколько способов по достижению рабочей точки в МЭ композитах без использования внешних источников магнитного поля. Одним из подходов для достижения рабочей точки является создание механических напряжений в МЭ структуре [8, 9]. Предварительная механическая деформация МЭ структуры обуславливает изменение магнитострикционного коэффициента, что приводит при определенной конфигурации к достижению максимального значения  $q$  [9]. Другим методом смещения магнитострикционного коэффициента в рабочую точку является использование дополнительных слоев, влияющих на магнитострикционную фазу за счет собственной остаточной намагниченности. В статье [10] при помощи локального нагрева лазером магнитострикционного слоя (метглас) был создан приповерхностный слой с рекристаллизованным материалом, содержащим фазу  $\alpha$ -Fe. Эта фаза после помещения ее в постоянное магнитное поле сохраняет остаточную намагниченность, которая способна воздействовать на более магнитомягкий метглас, и как следствие порождать ненулевой МЭ коэффициент в отсутствие внешнего магнитного поля. В работе [11] продемонстрировано, что в трехслойной структуре метглас/Ni/PZT ненулевое значение МЭ коэффициента без подачи внешнего магнитного поля может быть достигнуто благодаря воздействию остаточной намагниченности более магнитотвердого материала (никель) на более магнитомягкий материал (метглас). Было достигнуто значение МЭ коэффициента в 1,6 В/(см $\cdot$ Э). В качестве подмагничивающего слоя также возможно использовать антиферромагнитные тонкие слои Mn<sub>70</sub>Ir<sub>30</sub> [12].

Нами ранее было показано, что применение бидоменных кристаллов ниобата лития (LiNbO<sub>3</sub>, LN) в композитных МЭ материалах в качестве пьезоэлектрической фазы позволяет значительно увеличить МЭ коэффициент [13, 14]. Лучшие образцы имеют рекордную чувствительность к пере-

менному магнитному полю среди композитных МЭ материалов, предел детектирования магнитных полей в работе [15] составил 92 фТл/Гц<sup>1/2</sup> на частоте изгибного резонанса 6862 Гц. Поскольку шум от внешних акустических вибраций резко снижает чувствительность МЭ структур к магнитным полям, в работе [16] нами была разработана и протестирована камертонная конструкция МЭ сенсора. При использовании чувствительного элемента на основе МЭ композита в форме камертона происходит эффективное подавление фонового акустического и теплового возбуждения. Было показано, что такая конструкция снижает влияние внешнего шума до 7 раз и увеличивает чувствительность к магнитному полю по сравнению с единичным МЭ датчиком.

Ниже представлены результаты отработки технологии электрохимического осаждения никеля на пластины LN Y + 128°-среза и исследования влияния отжига в магнитном поле на МЭ коэффициент в трехслойных градиентных композитах LiNbO<sub>3</sub>/Ni/метглас.

### Образцы и методы исследования

В качестве основы для МЭ структур использовали кристаллы LN Y + 128°-среза. Отработку режимов отжига слоев никеля проводили на образцах с линейными размерами 5 × 30 × 0,5 мм<sup>3</sup>. После того, как был определен оптимальный режим отжига, измерения выполняли на более длинном образце с размерами и 5 × 50 × 0,5 мм<sup>3</sup>. Увеличение длины структуры позволяет уменьшить резонансную частоту изгибной моды и повысить чувствительность МЭ структуры к низкочастотным магнитным полям, что важно для последующих применений в биомедицинских устройствах [17]. В пластинах LN с помощью диффузионного отжига [13] формировали сегнетоэлектрическую бидоменную структуру. Никель, выступавший в качестве подмагничивающего слоя, наносили на бидоменные кристаллы LN методом электрохимического осаждения. В качестве электрода для проведения осаждения использовали пленку титана толщиной ~100 нм, нанесенную на одну из сторон кристалла методом магнетронного распыления. После формирования на поверхности LN слоя никеля, образцы отжигали в постоянном магнитном поле. В качестве магнитострикционного слоя использовали метглас марки 2826MB, который наносили на структуры LN/никель при помощи эпоксидного клея после их отжига в магнитном поле.

**Электрохимическое осаждение.** Схема установки для электрохимического осаждения представлена на рис. 1. Источник питания 1 стабилизирует значение тока, протекающего между никелевым

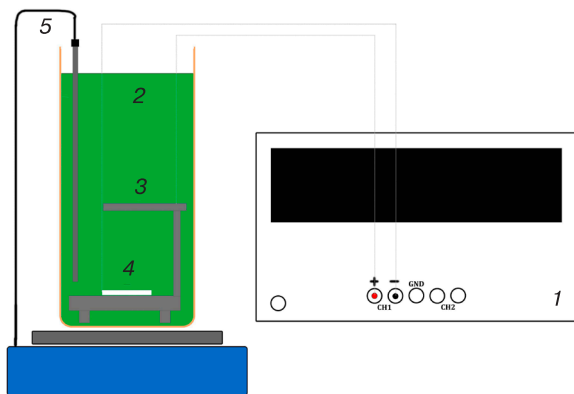


Рис. 1. Схема установки для проведения электрохимического осаждения никеля

Fig. 1. Schematic of nickel electrochemical deposition plant

анодом 3 и бидоменным кристаллом LN 4, которые находятся в растворе 2.

Процессы электрохимического осаждения проводили при температуре 65 °С. В качестве электролита использовали водный раствор сульфата никеля (концентрация — 300 г/л) и борной кислоты (90 г/л). Ток в цепи ограничивали значением в 25 мА.

Скорость электрохимического осаждения зависит от многих параметров, в том числе от площади осаждаемой поверхности, поэтому она отличается для разных образцов. Так, для образца длиной 50 мм скорость осаждения составила 1 мкм/мин, а для образцов длиной 30 мм — 1,3 мкм/мин. Итоговая толщина слоя никеля составляла 10 мкм.

**Отжиг в постоянном магнитном поле.** Схематическое изображение установки для проведения отжига в постоянном магнитном поле представлено

на рис. 2. Внешний корпус 1 изготовлен из шамотного кирпича. Электрический ток, вырабатываемый источником питания 7, пропускается через нихромовую проволоку нагревательного элемента 3, разогревая алюминиевый теплораспределитель 2. Образцы 5 расположены вдоль направления силовых линий внешнего однородного магнитного поля 6.

Для определения влияния температуры отжига на МЭ свойства изготовленных образцов была проведена серия отжигов при температуре 350, 360, 380 и 390 °С с временем выдержки 2 мин. Индукция внешнего магнитного поля составляла 330 мТл.

**Методика измерений магнитоэлектрического эффекта.** Принципиальная схема измерительной установки представлена на рис. 3. С генератора синхронного детектора (локина) 1 на катушки Гельмгольца 2 подается переменный синусоидальный сигнал. Исследуемый образец 3 деформируется под воздействием переменного магнитного поля, вследствие чего на рабочих гранях пьезоэлектрического кристалла LN образуется разность потенциалов, которая регистрируется синхронным детектором. Процесс измерения компьютеризирован, данные сохраняются в память компьютера 4.

При квазистатических измерениях напряженность постоянного внешнего магнитного поля изменялась в диапазоне от –8 до 8 Э, амплитуда и частота переменного магнитного поля составляли 0,1 Э и 117 Гц соответственно.

Динамические измерения проводили в частотном диапазоне от 10 Гц до 1 кГц при подаче переменного магнитного поля амплитудой 0,1 Э.

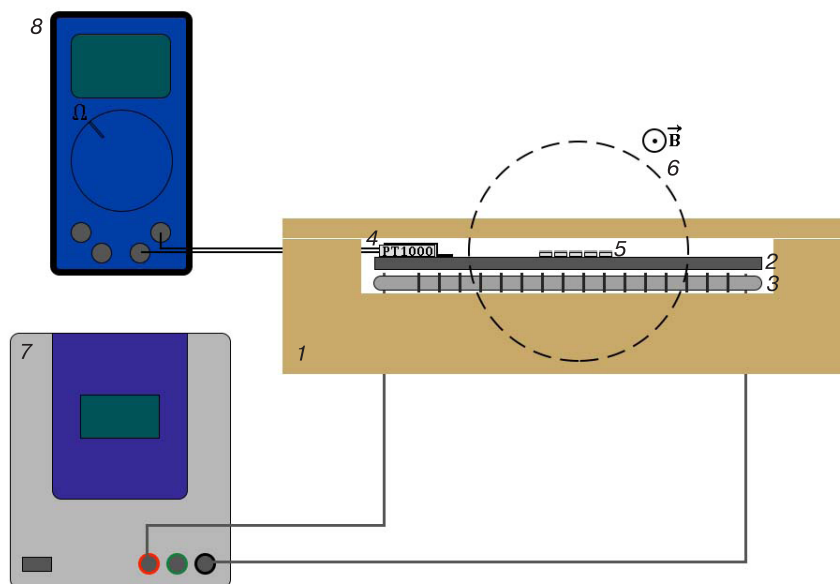


Рис. 2. Схематическое изображение установки для отжига МЭ структур в постоянном магнитном поле:

1 — внешний корпус печи; 2 — алюминиевый теплораспределитель; 3 — нагревательный элемент; 4 — терморезистор PT1000; 5 — образцы; 6 — внешнее однородное магнитное поле; 7 — источник питания; 8 — мультиметр

Fig. 2. Schematic of installation for annealing of ME structures in permanent magnetic field: (1) external furnace enclosure; (2) aluminum heat distributor; (3) heating element; (4) PT1000 thermistor; (5) specimens; (6) external uniform magnetic field; (7) power source; (8) multimeter

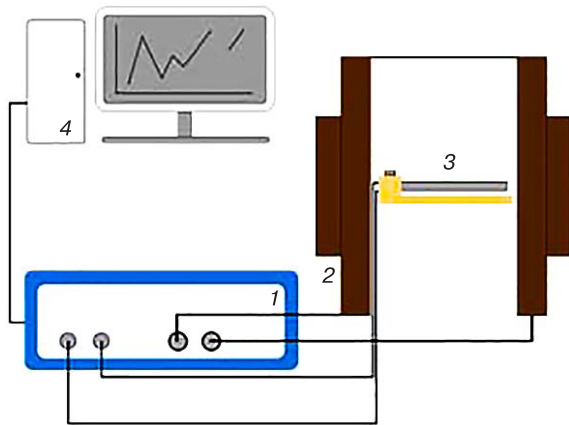


Рис. 3. Принципиальная схема установки для измерения МЭ коэффициента

Fig. 3. Schematic diagram of ME coefficient measuring setup

Каждый образец исследовали при подаче оптимального постоянного магнитного поля и без подачи постоянного магнитного поля.

### Результаты и их обсуждение

Результаты измерений квазистатического МЭ коэффициента  $\alpha$  образцов размером  $5 \times 30 \times 0,5 \text{ мм}^3$ , отожженных в магнитном поле при различных температурах, представлены на рис. 4. Значения МЭ коэффициентов без подачи постоянного поля варьируются у различных образцов от 0,1 до 0,2 В/(см·Э). Наблюдается последовательное смещение кривой зависимости МЭ коэффициента от магнитного поля в сторону значения  $H_{dc} = 0$  при увеличении температуры отжига образцов. Так, наибольшее значение смещения графика относительно начала координат составляет 2,8 Э и соот-

ветствует образцу, который был отожжен в магнитном поле при температуре 350 °С. Наименьшее смещение графика составляло 1 Э и было получено для образца, который был отожжен в магнитном поле при температуре 390 °С. В дальнейшем при изготовлении МЭ образца длиной 50 мм для достижения максимального ненулевого МЭ коэффициента без подачи внешнего магнитного поля использовали отжиг при температуре 350 °С.

После определения оптимальных параметров отжига были проведены измерения квазистатического и динамического МЭ коэффициента структуры длиной 50 мм с подмагничивающим слоем никеля до и после отжига. Образец был отожжен во внешнем магнитном поле при температуре 350 °С. Результаты измерений представлены на рис. 5.

Результаты измерения зависимости МЭ коэффициента от напряженности постоянного магнитного поля представлены на рис. 5, а. После проведения отжига график зависимости МЭ коэффициента сместился на 0,3 Э вправо, что привело к появлению ненулевого МЭ эффекта в отсутствие внешнего постоянного магнитного поля. МЭ коэффициент при  $H_{dc} = 0$  составил 1,2 В/(см·Э). Также после отжига наблюдается увеличение максимального значения МЭ коэффициента при оптимальном поле с напряженностью около 2 Э до значения примерно 5,8 В/(см·Э).

На рис. 5, б представлены результаты измерения зависимости МЭ коэффициента от частоты переменного магнитного поля. Измерения были проведены при оптимальном постоянном магнитном поле 2 Э и без приложения внешнего магнитного поля. Максимальное значение МЭ коэффициента достигнуто на частоте изгибного резонанса струк-

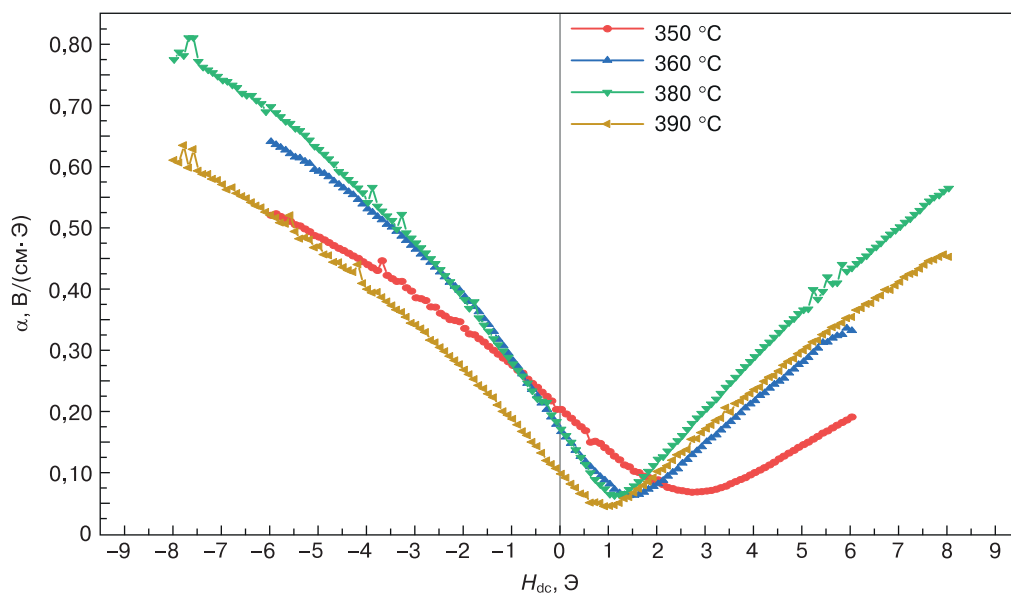


Рис. 4. Результаты квазистатических измерений МЭ коэффициента градиентных структур  $\text{LiNbO}_3/\text{Ni}/\text{метглас}$ , отожженных при различных температурах в постоянном магнитном поле

Fig. 4. Results of quasi-static ME coefficient measurements for  $\text{LiNbO}_3/\text{Ni}/\text{Metglas}$  structures annealed at different temperatures in a permanent magnetic field

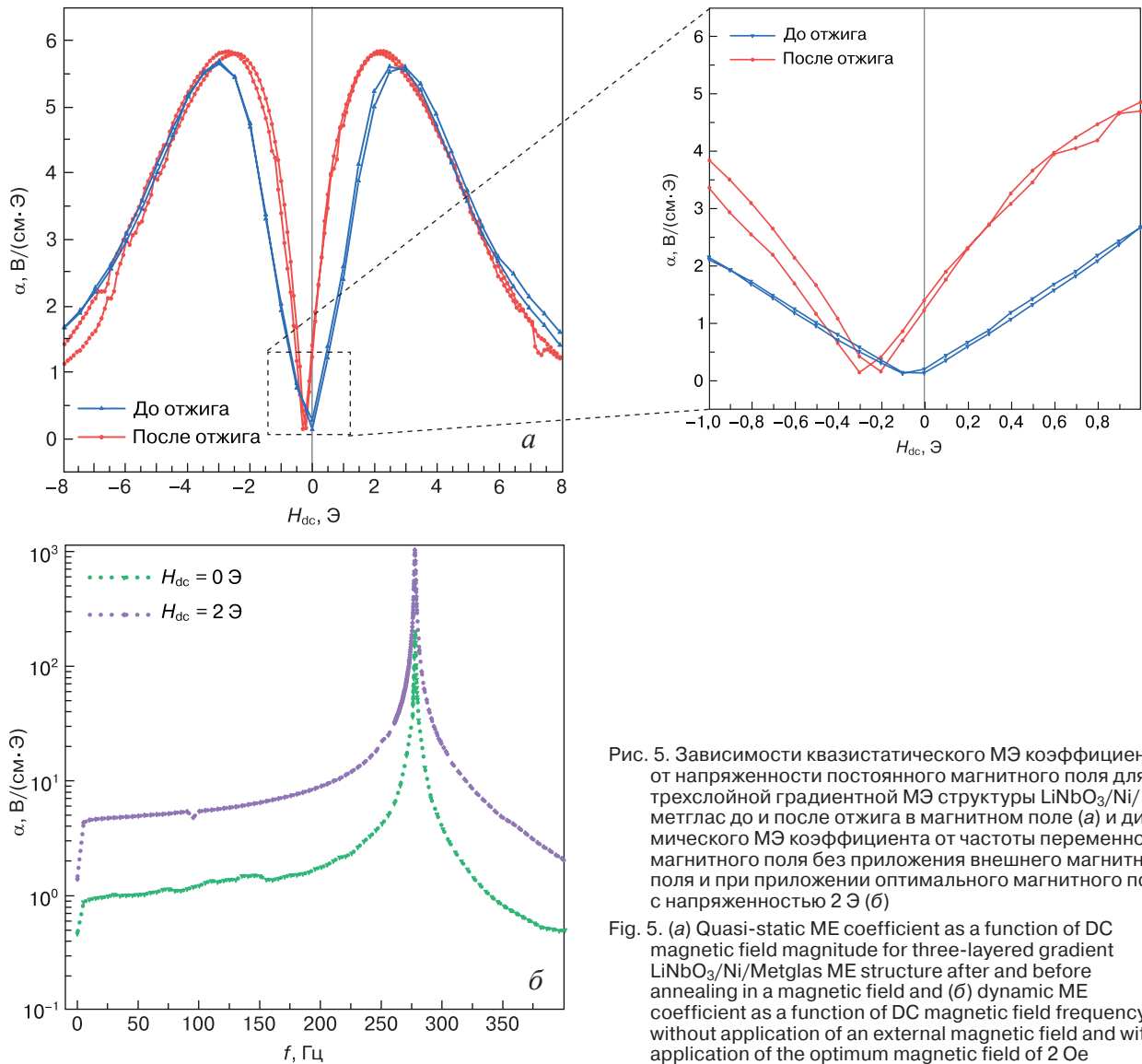


Рис. 5. Зависимости квазистатического МЭ коэффициента от напряженности постоянного магнитного поля для трехслойной градиентной МЭ структуры  $\text{LiNbO}_3/\text{Ni}/\text{метглас}$  до и после отжига в магнитном поле (а) и динамического МЭ коэффициента от частоты переменного магнитного поля без приложения внешнего магнитного поля и при приложении оптимального магнитного поля с напряженностью 2 Э (б)

Fig. 5. (a) Quasi-static ME coefficient as a function of DC magnetic field magnitude for three-layered gradient  $\text{LiNbO}_3/\text{Ni}/\text{Metglas}$  ME structure after and before annealing in a magnetic field and (b) dynamic ME coefficient as a function of DC magnetic field frequency without application of an external magnetic field and with application of the optimum magnetic field of 2 Oe

туры 278 Гц. Без приложения внешнего магнитного поля МЭ коэффициент составил 199,3 В/(см·Э), а при оптимальном магнитном поле 1024 В/(см·Э).

В табл. 1 приведены результаты сравнения полученных в настоящей работе и известных из литературы значений квазистатического и динамического (на частоте резонанса) МЭ коэффициента без приложения внешнего магнитного поля для различных конфигураций МЭ композитных структур.

Полученные в данной работе значения МЭ коэффициента  $\alpha$  в трехслойных градиентных композитах  $\text{LiNbO}_3/\text{Ni}/\text{метглас}$  не уступают большинству МЭ композитных материалов. Лишь для структур на основе свинецсодержащих пьезоэлектрических керамик (PZT) наблюдается больший МЭ коэффициент. Представленные нами трехслойные градиентные композиты  $\text{LiNbO}_3/\text{Ni}/\text{метглас}$  требуют оптимизации соотношения толщин Ni и метгласа для увеличения МЭ коэффициента без приложения внешнего магнитного поля.

## Заключение

Представлена технология осаждения никеля на бидоменные кристаллы LN Y + 128°-срез. Показано влияние отжигов электрохимически осажденных слоев никеля в постоянном магнитном поле на МЭ коэффициент структур. Оптимальная температура отжига составила 350 °С. При данной температуре был достигнут максимальный сдвиг зависимости МЭ коэффициента относительно  $H_{dc} = 0$ . После определения оптимальных параметров отжига были проведены измерения квазистатического и динамического МЭ коэффициента структуры длиной 50 мм с подмагничивающим слоем никеля до и после отжига. МЭ коэффициент при  $H_{dc} = 0$  составил 1,2 В/(см·Э) при смещении кривой зависимости МЭ коэффициента по полю на 0,3 Э. Максимальное значение МЭ коэффициента достигнуто на частоте изгибного резонанса структуры 278 Гц. Без приложения внешнего магнитного поля МЭ коэффициент составил 199,3 В/(см·Э).

Таблица 1 / Table 1

**Сравнение магнитоэлектрических коэффициентов для различных композитных структур без приложения внешнего магнитного поля ( $H_{dc} = 0$ )**  
 Comparison between ME coefficients for different composite structures without application of an external magnetic field ( $H_{dc} = 0$ )

МЭ композит	$\alpha$ , В/(см · Э)	
	Квазистатический	Динамический
FeCuNbSiB/Ni–PZT–FeCuNbSiB/Ni [18]	—	183,2 (при $f_r = 158,34$ кГц)
FeCuNbSiB/Terfenol–D/Be–bronze/PZT [19]	20 (при $f_{AC} = 37$ кГц)	0,33 (при $f_r = 1300$ Гц); 11,5 (при $f_r = 37$ кГц)
Ni/PZT/FeNi [20]	0,225 (при $f_{AC} = 1$ кГц)	—
FeNi/PZT/Ni в виде кольца [21]	0,035 (при $f_{AC} = 1$ кГц)	—
Metglas/PZT/Ni с неодимовым магнитом в виде массы на окончании кантилевера [22]	–	55,7 (при $f_r = 270$ Гц)
Частично отожженный Metglas/PMN–PZT [23]	20 (при $f_{AC} = 1$ кГц)	1220 (при $f_r = 23,32$ кГц)
CFO <sub>0,55</sub> –CNT <sub>0,1</sub> –PVDF <sub>0,35</sub> /P(VDF–TrFE)/CFO <sub>0,55</sub> –CNT <sub>0,1</sub> –PVDF <sub>0,35</sub> [24]	0,0167 (при $f_{AC} = 1$ кГц)	–
NKNLS–NZF/Ni/NKNLS–NZF [25]	11,78 (при $f_{AC} = 100$ Гц)	27,3 (при $f_r = 23,32$ кГц, $H_{dc} = 34$ Э)
FeCuNbSiB/Terfenol–D/Be–bronze/PMN–PT [26]	20 (при $f_{AC} = 31$ кГц)	33 (при $f_r = 23,13$ кГц)
Ta–Pt–AlN–Cr–Au/Si/Ta–Cu–Mn <sub>3</sub> Ir–(Fe <sub>90</sub> Co <sub>10</sub> ) <sub>78</sub> Si <sub>12</sub> B <sub>10</sub> –Ta–Cu–Mn <sub>3</sub> Ir–(Fe <sub>90</sub> Co <sub>10</sub> ) <sub>78</sub> Si <sub>12</sub> B <sub>10</sub> [27]	0,3 (при $f_{AC} = 797$ Гц)	—
SrFe <sub>12</sub> O <sub>19</sub> /Metglas/PZT [28]	1 (при $f_{AC} = 1$ кГц)	29 (при $f_r = 120$ кГц)
Metglas/PVDF/Ni [29]	—	38,24 (при $f_r = 48,8$ кГц)
Metglas/Terfenol–D/PZT [30]	—	16 (при $f_r = 40$ кГц)
PZT/Ni/Metglas [11]	1,6 (при $f_{AC} = 100$ Гц)	15 (при $f_r = 170$ Гц)
Metglas/PZT/Metglas [31]	12 (при $f_{AC} = 1$ кГц)	380 (при $f_r = 33,7$ кГц)
PZT/NZFO/PZT [32]	0,037 (при $f_{AC} = 1$ кГц)	—
AlN/Ta–Cu–Mn <sub>70</sub> Ir <sub>30</sub> –Fe <sub>70,2</sub> Co <sub>7,8</sub> Si <sub>12</sub> B <sub>10</sub> [12]	—	96,7 (при $f_r = 1197$ Гц)
LiNbO <sub>3</sub> /Ni/метглас	1,2 (при $f_{AC} = 117$ Гц)	199,3 (при $f_r = 278$ Гц)

Обозначения:  $f_{AC}$  — частота модуляции магнитного поля для квазистатического измерения МЭ эффекта;  $f_r$  — частота изгибного резонанса структуры.

Достигнутые результаты конкурентоспособны по сравнению с ранее опубликованными структурами. Дальнейшее увеличение МЭ коэффициента без приложения внешнего магнитного поля возможно за счет выбора оптимального соотношения

толщин никеля и метгласа, исключения клеевого слоя между никелем и метгласом и изменения состава подмагничивающего слоя (использование материалов с большей остаточной намагниченностью).

**Библиографический список / References**

1. Eerenstein W., Mathur N.D., Scott J.F. Multiferroic and magnetoelectric materials. *Nature*. 2006; 442: 759—765. <https://doi.org/10.1038/nature05023>

2. Vopson M.M. Fundamentals of multiferroic materials and their possible applications. *Critical Reviews in Solid*

- State and Materials Sciences*. 2015; 40: 223—250. <https://doi.org/10.1080/10408436.2014.992584>
3. Nan C.W., Bichurin M.I., Dong S., Viehland D., Srinivasan G. Multiferroic magnetoelectric composites: historical perspective, status, and future directions. *Journal of Applied Physics*. 2008; 103(3): 031101—031136. <https://doi.org/10.1063/1.2836410>
  4. Bichurin M., Viehland D., Srinivasan G. Magneto-electric Interactions in ferromagnetic–piezoelectric layered structures: Phenomena and devices. *Journal of Electroceramics*. 2007; 19(4): 243—250. <https://doi.org/10.1007/s10832-007-9058-x>
  5. Tu C., Chu Z.-Q., Spetzler B., Hayes P., Dong C.-Z., Liang X.-F., Chen H.-H., He Y.-F., Wei Y.-Y., Lisenkov I., Lin H., Lin Y.-H., McCord J., Faupel F., Quandt E., Sun N.-X. mechanical–resonance–enhanced thin–film magnetoelectric heterostructures for magnetometers, mechanical antennas, tunable RF inductors, and filters. *Materials (Basel)*. 2019; 12(14): 22—52. <https://doi.org/10.3390/ma12142259>
  6. Fiebig M. Revival of the magnetoelectric effect. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2005; 38(8): 123—152. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/38/8/R01>
  7. Palneedi H., Annapureddy V., Priya S., Ryu J. Status and perspectives of multiferroic magnetoelectric composite materials and applications. *Actuators*. 2016; 5(1): 9—40. <https://doi.org/10.3390/act5010009>
  8. Yang S., Xu J., Zhang X., Fan S., Zhang C., Huang Y., Li Q., Wang X., Cao D., Xu J. Self–biased Metglas/PVDF/Ni magnetoelectric laminate for AC magnetic sensors with a wide frequency range. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2022; 55(17): 175002—175003. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ac4cf5>
  9. Jing W.Q., Fang F. Stress–induced self–biasing of magnetoelectric coupling in embedded Ni/PZT/FeNi composite. *Applied Physics Letters*. 2015; 106(21): 212901—212902. <https://doi.org/10.1063/1.4921743>
  10. Pourhosseiniasl M., Yu Z., Chu Z., Yang J., Xu J., Hou Y., Dong S. Enhanced self–bias magnetoelectric effect in locally heat–treated ME laminated composite. *Applied Physics Letters*. 2019; 115(11): 112901—112902. <https://doi.org/10.1063/1.5116625>
  11. Mandal S.K., Sreenivasulu G., Petrov V.M., Srinivasan G. Magnetization–graded multiferroic composite and magnetoelectric effects at zero bias. *Physical Review B: Condensed Matter and Materials Physics*. 2011; 84(1): 011432—014440. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.84.014432>
  12. Lage E., Kirchoff C., Hrkac V., Kienle L., Jahns R., Knöchel R., Quandt E., Meyners D. Biasing of magnetoelectric composites. *Nature Materials*. 2012; 11(6): 523—529. <https://doi.org/10.1038/nmat3306>
  13. Kubasov I.V., Kislyuk A.M., Turutin A.V., Malinkovich M.D., Parkhomenko Y.N. Bidomain ferroelectric crystals: properties and prospects of application. *Russian Microelectronics*. 2021; 50(8): 571—616. <https://doi.org/10.1134/S1063739721080035>
  14. Turutin A.V., Kubasov I.V., Kislyuk A.M., Kuts V.V., Malinkovich M.D., Parkhomenko Y.N., Sobolev N.A. Ultra-sensitive magnetoelectric sensors of magnetic fields for biomedical applications. *Nanobiotechnology Reports*. 2022; 17: 261—289. <https://doi.org/10.1134/S2635167622030223>
  15. Turutin A.V., Vidal J.V., Kubasov I.V., Kislyuk A.M., Malinkovich M.D., Parkhomenko Y.N., Kobeleva S.P., Parkhomov O.V., Kholkin A.L., Sobolev N.A. Magnetoelectric metglas/bidomain y +140°–cut lithium niobate composite for sensing FT magnetic fields. *Applied Physics Letters*. 2018; 112(26): 262906—263100. <https://doi.org/10.1063/1.5038014>
  16. Turutin A.V., Vidal J.V., Kubasov I.V., Kislyuk A.M., Kiselev D.A., Malinkovich M.D., Parkhomenko Y.N., Kobeleva S.P., Kholkin A.L., Sobolev N.A. Highly sensitive magnetic field sensor based on a metglas/bidomain lithium niobate composite shaped in form of a tuning fork. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2019; 486: 165209—165253. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.04.061>
  17. Liang X., Matyushov A., Hayes P., Schell V., Dong C., Chen H., He Y., Will–Cole A., Quandt E., Martins P., Mccord J., Medarde M., Lanceros–Méndez S., Van Dijken S., Sun N., Sort J. Roadmap on magnetoelectric materials and devices. *IEEE Transactions of Magnetics*. 2021; 57(8): 4000157—400400213. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2021.3086635>
  18. Huang D., Lu C., Han B., Wang X., Li C., Xu C., Gui J., Lin C. Giant self–biased magnetoelectric coupling characteristics of three–phase composite with end–bonding structure. *Applied Physics Letters*. 2014; 105(1): 0263502—0263507. <https://doi.org/10.1063/1.4904799>
  19. Zhang H., Lu C., Sun Z. Large self–biased magnetoelectric response in four–phase heterostructure with multiple low–frequency peaks. *Applied Physics Letters*. 2015; 106(3): 033505—0335101. <https://doi.org/10.1063/1.4906414>
  20. Jing W.Q., Fang F. Stress–induced self–biasing of magnetoelectric coupling in embedded Ni/PZT/FeNi composite. *Applied Physics Letters*. 2015; 106(21): 212901—212902. <https://doi.org/10.1063/1.4921743>
  21. Kumar A., Arockiarajan A. Temperature dependent magnetoelectric (ME) response in press–fit FeNi/PZT/Ni self–biased ring composite. *Journal of Applied Physics*. 2019; 106(9): 094102—094103. <https://doi.org/10.1063/1.5108708>
  22. Deka B., Lee Y.W., Yoo I.R., Gwak D.W., Cho J., Song H.C., Choi J.J., Hahn B.D., Ahn C.W., Cho K.H. Designing ferroelectric/ferromagnetic composite with giant self–biased magnetoelectric effect. *Applied Physics Letters*. 2019; 115(19): 192901—192903. <https://doi.org/10.1063/1.5128163>
  23. Pourhosseiniasl M.J., Yu Z., Chu Z., Yang J., Xu J.J., Hou Y., Dong S. Enhanced self–bias magnetoelectric effect in locally heat–treated ME laminated composite. *Applied Physics Letters*. 2019; 115(11): 112901—112902. <https://doi.org/10.1063/1.5116625>
  24. Jing W.Q., Fang F. A flexible multiferroic composite with high self–biased magnetoelectric coupling. *Composites Science and Technology*. 2017; 153: 145—150. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2017.10.010>
  25. Yang S.C., Park C.S., Cho K.H., Priya S. Self–biased magnetoelectric response in three–phase laminates. *Journal of Applied Physics*. 2010; 108(9): 093706—6. <https://doi.org/10.1063/1.3493154>
  26. Huang D., Lu C., Bing H. Multipeak self–biased magnetoelectric coupling characteristics in four–phase Metglas/Terfenol–D/Be–bronze/PMN–PT structure. *AIP Advances*. 2015; 5(4): 047140—047147. <https://doi.org/10.1063/1.4919248>
  27. Jovičević K.M., Thormählen L., Röbisch V., Toxværd S.D., Höft M., Knöchel R., Quandt E., Meyners D., McCord J. Antiparallel exchange biased multilayers for low magnetic noise magnetic field sensors. *Applied Physics Letters*. 2019; 114(19): 192410—192429. <https://doi.org/10.1063/1.5092942>
  28. Ma J.N., Xin C.Z., Ma J., Lin Y.H., Nan C.W. A cost–effective self–biased magnetoelectric effect in SrFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub>/



Metglas/Pb(Zr,Ti)O<sub>3</sub> laminates. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2016; 49(40): 405002—405007. <http://dx.doi.org/10.1088/0022-3727/49/40/405002>

29. Yang S., Xu J., Zhang X., Fan S., Zhang Ch.-Y., Huang Y.-C., Li Q., Wang X., Cao D., Li Sh. Self-biased Metglas/PVDF/Ni magnetoelectric laminate for AC magnetic sensors with a wide frequency range. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2022;55(17): 175002—175003. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ac4cf5>

30. Chen L., Li P., Wen Y., Zhu Y. Near-flat self-biased magnetoelectric response in three-phase Metglas/Terfenol-D/PZT-laminated composites. *IEEE Transac-*

*tions on Magnetics*. 2015; 51(11). <https://doi.org/10.1109/TMAG.2015.2451140>

31. Li M., Wang Z., Wang Y., Li J., Viehland D. Giant magnetoelectric effect in self-biased laminates under zero magnetic field. *Applied Physics Letters*. 2013; 102(8): 082404—082601. <https://doi.org/10.1063/1.4794056>

32. Mandal S.K., Sreenivasulu G., Petrov V.M., Srinivasan G. Flexural deformation in a compositionally stepped ferrite and magnetoelectric effects in a composite with piezoelectrics. *Applied Physics Letters*. 2010; 96(19): 192502—192503-3. <https://doi.org/10.1063/1.3428774>

### Информация об авторах / Information about the authors

**Куц Виктор Викторович** — младший научный сотрудник, кафедра материаловедения полупроводников и диэлектриков; Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Москва, 119049, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9780-5686>; e-mail: [viktor.kuts.3228@yandex.ru](mailto:viktor.kuts.3228@yandex.ru)

**Турутин Андрей Владимирович** — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, кафедра материаловедения полупроводников и диэлектриков; Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Москва, 119049, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1090-3441>; e-mail: [aturutin92@gmail.com](mailto:aturutin92@gmail.com)

**Кислюк Александр Михайлович** — научный сотрудник, кафедра материаловедения полупроводников и диэлектриков; Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Москва, 119049, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7185-8715>; e-mail: [akislyuk94@gmail.com](mailto:akislyuk94@gmail.com)

**Кубасов Илья Викторович** — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, кафедра материаловедения полупроводников и диэлектриков; Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Москва, 119049, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6569-466X>; e-mail: [kubasov.ilya@gmail.com](mailto:kubasov.ilya@gmail.com)

**Жуков Роман Николаевич** — научный сотрудник, кафедра материаловедения полупроводников и диэлектриков; Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Москва, 119049, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4997-3837>; e-mail: [rom\\_zhuk94@gmail.com](mailto:rom_zhuk94@gmail.com)

**Темиров Александр Анатольевич** — научный сотрудник, кафедра материаловедения полупроводников и диэлектриков; Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Москва, 119049, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9965-1046>; e-mail: [temirov.alex@yandex.ru](mailto:temirov.alex@yandex.ru)

**Малинкович Михаил Давыдович** — канд. физ.-мат. наук, доцент, кафедра материаловедения полупроводников и диэлектриков; Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Москва, 119049, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9531-6072>; e-mail: [malinkovich@yandex.ru](mailto:malinkovich@yandex.ru)

**Viktor V. Kuts** — Junior Researcher, Department of Materials Science of Semiconductors and Dielectrics; National University of Science and Technology MISIS, 4-1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9780-5686>; e-mail: [viktor.kuts.3228@yandex.ru](mailto:viktor.kuts.3228@yandex.ru)

**Andrei V. Turutin** — Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher, Department of Materials Science of Semiconductors and Dielectrics; National University of Science and Technology MISIS, 4-1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1090-3441>; e-mail: [aturutin92@gmail.com](mailto:aturutin92@gmail.com)

**Alexander M. Kislyuk** — Researcher, Department of Materials Science of Semiconductors and Dielectrics; National University of Science and Technology MISIS, 4-1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7185-8715>; e-mail: [akislyuk94@gmail.com](mailto:akislyuk94@gmail.com)

**Ilya V. Kubasov** — Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher, Department of Materials Science of Semiconductors and Dielectrics; National University of Science and Technology MISIS, 4-1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6569-466X>; e-mail: [kubasov.ilya@gmail.com](mailto:kubasov.ilya@gmail.com)

**Roman N. Zhukov** — Researcher, Department of Materials Science of Semiconductors and Dielectrics; National University of Science and Technology MISIS, 4-1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4997-3837>; e-mail: [rom\\_zhuk94@gmail.com](mailto:rom_zhuk94@gmail.com)

**Alexander A. Temirov** — Researcher, Department of Materials Science of Semiconductors and Dielectrics; National University of Science and Technology MISIS, 4-1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9965-1046>; e-mail: [temirov.alex@yandex.ru](mailto:temirov.alex@yandex.ru)

**Mikhail D. Malinkovich** — Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Department of Materials Science of Semiconductors and Dielectrics; National University of Science and Technology MISIS, 4-1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9531-6072>; e-mail: [malinkovich@yandex.ru](mailto:malinkovich@yandex.ru)

**Соболев Николай Андреевич** — канд. физ.–мат. наук, научный сотрудник, кафедра материаловедения полупроводников и диэлектриков, лаборатория ФНС; Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Москва, 119049, Российская Федерация; доктор естественных наук, профессор; Университет Авейру, 3810–193 Авейру, Португалия; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9420-8130>; e-mail: [niksob@gmail.com](mailto:niksob@gmail.com)

**Пархоменко Юрий Николаевич** — доктор физ.–мат. наук, профессор, научный руководитель, кафедра материаловедения полупроводников и диэлектриков, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Москва, 119049, Российская Федерация; научный консультант, АО «Государственный научно-исследовательский и проектный институт редкометаллической промышленности «Гиредмет», Электродная ул., д. 2, стр. 1, Москва, 111524, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1970-9867>; e-mail: [parkh@rambler.ru](mailto:parkh@rambler.ru)

**Nikholai A. Sobolev** — Cand. Sci. (Phys.–Math.), Researcher, Department of Materials Science of Semiconductors and Dielectrics; National University of Science and Technology MISIS, 4–1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation; PhD, Associate Professor, Department of Physics; Universidade de Aveiro, 3810–193 Aveiro, Portugal; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9420-8130>; e-mail: [niksob@gmail.com](mailto:niksob@gmail.com)

**Yuri N. Parkhomenko** — Dr. Sci. (Phys.–Math.), Professor, Scientific Consultant, Department of Materials Science of Semiconductors and Dielectrics; National University of Science and Technology MISIS, 4–1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation; Scientific Consultant; Federal State Research and Development Institute of Rare Metal Industry (Giredmet JSC), 2–1 Elektrodnyaya Str., Moscow 111524, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1970-9867>; e-mail: [parkh@rambler.ru](mailto:parkh@rambler.ru)

*Поступила в редакцию 29.11.2022; поступила после доработки 23.01.2023; принята к публикации 31.01.2023  
Received 30 November 2022; Revised 23 January 2023; Accepted 31 January 2023*

\* \* \*