

ISSN 1561-8358 (Print)  
ISSN 2524-244X (Online)

**МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ, МЕТАЛЛУРГИЯ**  
**MATERIALS SCIENCES AND ENGINEERING, METALLURGY**

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-1-7-16>  
УДК 537.635:538.935:539.216:621.793.18



Оригинальная статья

**А. И. Серокурова\*, С. А. Шарко, Н. Н. Новицкий**

*Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению,  
ул. П. Бровки, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь*

**СВЧ-ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ В ВИДЕ СУБМИКРОННЫХ ПЛЕНОК  $Y_3Fe_5O_{12}$   
НА НЕОРИЕНТИРОВАННЫХ ПОДЛОЖКАХ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ  
КЕРАМИКИ: СИНТЕЗ, СВОЙСТВА И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ**

**Аннотация.** Получены монолитные структуры железо-иттриевого граната (YIG,  $Y_3Fe_5O_{12}$ ) толщиной около 2 мкм на сегнетоэлектрических керамических подложках на основе  $PbZr_{0.45}Ti_{0.55}O_3$  (PZT) и  $Ba_{0.4}Sr_{0.6}TiO_3$  (BST). Слой  $Y_3Fe_5O_{12}$  был нанесен методом ионно-лучевого распыления-осаждения на подложки толщиной 400 мкм путем распыления поликристаллической мишени состава  $Y_3Fe_5O_{12}$  ионами аргона. Гетероструктуры кристаллизовались отжигом на воздухе при температуре 820 °С в течение 5 мин. Результаты применения метода характеристического рентгеновского излучения показали, что элементный состав монолитной гетероструктуры соответствует заданному. В ходе рентгеновских исследований установлено, что процесс кристаллизации YIG завершен и полученная структура является однофазной. Результаты магнитных исследований и исследований методом ферромагнитного резонанса говорят о возможности использования полученных гетероструктур в логических схемах на основе спиновых волн с малым рассеиванием, в элементах памяти, а также в электрически управляемых устройствах СВЧ-диапазона.

**Ключевые слова:** феррит-гранатовые слои, сегнетоэлектрическая подложка, буферный слой, поликристаллическая структура, ионно-лучевое распыление

**Благодарности:** работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект T22M-001).

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Информация об авторах:** *Серокурова Александра Ивановна\** – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Научно-практического центра Национальной академии наук Беларуси по материаловедению. E-mail: [aleksa.serokurova@yandex.by](mailto:aleksa.serokurova@yandex.by); *Шарко Сергей Александрович* – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Научно-практического центра Национальной академии наук Беларуси по материаловедению. E-mail: [sharko@physics.by](mailto:sharko@physics.by); *Новицкий Николай Николаевич* – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Научно-практического центра Национальной академии наук Беларуси по материаловедению. E-mail: [novitski@ifftp.bas-net.by](mailto:novitski@ifftp.bas-net.by)

**Вклад авторов:** *Серокурова Александра Ивановна* – разработка методологии исследования, написание и оформление текста рукописи, подготовка образцов, интерпретация результатов, обобщение результатов исследования; *Шарко Сергей Александрович* – обоснование концепции исследования, интерпретация результатов, редактирование текста рукописи, формулировка выводов; *Новицкий Николай Николаевич* – разработка методологии исследования, подготовка образцов, работа с графическим материалом, интерпретация результатов.

**Для цитирования:** Серокурова, А. И. СВЧ-гетероструктуры в виде субмикронных пленок  $Y_3Fe_5O_{12}$  на неориентированных подложках сегнетоэлектрической керамики: синтез, свойства и перспективы применения / А. И. Серокурова, С. А. Шарко, Н. Н. Новицкий // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2024. – Т. 69, № 1. – С. 7–16. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-1-7-16>

*Поступила в редакцию:* 22.06.2023

*Доработанный вариант:* 15.12.2023

*Утверждена к публикации:* 22.02.2024

*Подписана в печать:* 15.03.2024

Original article

Aleksandra I. Serokurova\*, Sergei A. Sharko, Nikolay N. Novitskii

*Scientific-Practical Materials Research Centre of the National Academy of Science of Belarus,  
19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus***MICROWAVE HETEROSTRUCTURES IN THE FORM OF SUBMICRON  $Y_3Fe_5O_{12}$  FILMS  
ON NON-ORIENTED FERROELECTRIC CERAMIC SUBSTRATES: SYNTHESIS, PROPERTIES,  
AND PROSPECTS FOR APPLICATIONS**

**Abstract.** In the work monolithic structures of yttrium iron garnet (YIG,  $Y_3Fe_5O_{12}$ ) with a thickness of about 2  $\mu\text{m}$  were obtained on ferroelectric ceramic substrates based on  $PbZr_{0.45}Ti_{0.55}O_3$  (PZT) and  $Ba_{0.4}Sr_{0.6}TiO_3$  (BST). The  $Y_3Fe_5O_{12}$  layer was deposited by ion beam sputtering deposition on substrates 400  $\mu\text{m}$  thick by sputtering a polycrystalline  $Y_3Fe_5O_{12}$  target with with argon ions. The heterostructures were crystallized by annealing in air at a temperature of 820  $^{\circ}\text{C}$  for 5 min. The results of the characteristic X-ray radiation method showed that the elemental composition of the monolithic heterostructure corresponds to the specified one. During X-ray studies, it was found that the YIG crystallization process is completed and the resulting structure is single-phase. The results of magnetic and ferromagnetic resonance studies indicate the possibility of using the obtained heterostructures in logic circuits based on spin waves with low scattering, in memory elements, as well as in electrically controlled microwave devices.

**Keywords:** ferrite-garnet layers, ferroelectric substrate, buffer layer, polycrystalline structure, ion-beam sputtering-deposition

**Acknowledgments:** the work was supported by the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (project T22M-001).

**Conflict of interest:** the authors declare that there is no conflict of interest.

**Information about the authors:** *Aleksandra I. Serokurova\** – Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Senior Researcher at Scientific-Practical Materials Research Centre of the National Academy of Science of Belarus. E-mail: serokurova@ifftp.bas-net.by; *Sergei A. Sharko* – Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Senior Researcher at Scientific-Practical Materials Research Centre of the National Academy of Science of Belarus. E-mail: sharko@physics.by; *Nikolay N. Novitskii* – Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Senior Researcher at Scientific-Practical Materials Research Centre of the National Academy of Science of Belarus. E-mail: novitski@ifftp.bas-net.by

**Contribution of the authors:** *Aleksandra I. Serokurova* – methodology, writing and formatting of the text of the manuscript, sample preparation, interpretation of the results, supervision, review and editing; *Sergei A. Sharko* – methodology, interpretation of the results, conceptualization, supervision, review and editing; *Nikolay N. Novitskii* – methodology, sample preparation, visualization, interpretation of the results.

**For citation:** Serokurova A. I., Sharko S. A., Novitskii N. N. Microwave heterostructures in the form of submicron  $Y_3Fe_5O_{12}$  films on non-oriented ferroelectric ceramic substrates: synthesis, properties, and prospects for applications. *Vestsi Natsyyanal' nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2024, vol. 69, no. 1, pp. 7–16 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-1-7-16>

*Received:* 22.06.2023

*Modified version:* 15.12.2023

*Approved for publication:* 22.02.2024

*Signed to the press:* 15.03.2024

**Введение.** Интенсивное развитие средств связи, телекоммуникаций, навигации и радиолокации в последние годы предъявляет повышенные требования к характеристикам приборов обработки СВЧ-сигнала (резонаторам, фильтрам, фазовращателям, линиям задержки и др.). Основные тенденции связаны с увеличением добротности устройств, снижением потерь и собственных шумов, возможностью электронной перестройки по частоте, фазе и времени задержки [1].

Множество устройств СВЧ, построенных на ферромагнитных материалах, работают в широком диапазоне частот. В основе широкого распространения ферромагнитных устройств лежат особенности волновых процессов в намагниченных монокристаллических пленках феррита, а именно распространение длинноволновых спиновых волн. Преимуществами таких волн являются низкие потери на распространение, разнообразие дисперсионных характеристик, а также низкие фазовая и групповая скорости, позволяющие реализовывать большое разнообразие миниатюрных СВЧ-устройств. Электронное управление существующими устройствами производится за счет изменения напряженности магнитного поля. Данный способ перестройки связан с необходимостью изменения тока в катушках электромагнита, а следовательно, основными недостатками выступают потребляемая мощность и габариты. Другим возможным способом электронного управления, присущим сегнетоэлектрическим материалам и устройствам на их основе, является перестройка за счет изменения электрического поля [1].

Новый актуальный тип СВЧ-материалов, обладающий мультиферроидными свойствами, построен на базе гетероструктур феррит/сегнетоэлектрик и перспективен для получения на их основе устройств стрейнтроники [1, 2]. Сочетание в одной и той же слоистой структуре феррита и сегнетоэлектрика позволяет управлять рабочими характеристиками СВЧ-устройств с помощью как магнитного, так и электрического полей.

Особый интерес при создании композитных мультиферроидных структур для устройств стрейнтроники СВЧ-диапазона представляют структуры на основе тонких пленок железо-иттриевого граната (YIG) [1, 2]. Спиновые волны с различными типами дисперсионных характеристик могут распространяться в этих структурах из-за низкого коэффициента затухания [3, 4]. Наличие в YIG магнитоупругих свойств с одной стороны и рекордно низкие скорости релаксации намагниченности – с другой позволяют управлять фазой, временем задержки, полосой фильтрации в композитных мультиферроидных структурах на основе YIG, а также бистабильностью спиновых волн.

В [5] получена двуслойная композитная структура YIG на сегнетоэлектрической керамической подложке на основе  $\text{PbZr}_{0,45}\text{Ti}_{0,55}\text{O}_3$  (PZT-подложке), описаны ее свойства и перспективы применения. Однако большинство существующих в настоящее время методов формирования таких структур основано на механическом соединении слоев. Существенными недостатками данных слоистых структур является то, что они не поддаются жидкостному травлению, не чувствительны к воздействию сухой плазмы и очень быстро деградируют при термоциклировании. Эти недостатки принципиальны и не допускают возможности обработки таких структур методами микроэлектроники.

Исходя из этого остается открытым вопрос разработки технологии получения композитных мультиферроидных структур методом ионно-лучевого распыления-осаждения [6, 7]. Ранее в [8–10] была показана возможность получения слоев YIG на полупроводниковых подложках GaAs, Si, GaN с помощью указанного метода. Обычно высококачественные эпитаксиальные феррит-гранатовые пленки из-за небольшого рассогласования решетки ( $\approx 0,06\%$ ) между YIG и материалами подложки получают методом жидкофазной эпитаксии (LPE) на подложках из гадолиний-галлиевого граната (GGG). Ранее было показано [8–10], что слои железо-иттриевого граната на кремниевых и кварцевых подложках имеют сравнительно низкое структурное совершенство по причине значительного рассогласования решетки и разных коэффициентов термического расширения между  $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  и Si.

Эти факты исключают эпитаксиальный рост слоев YIG непосредственно на PZT-подложке. Однако если удастся разделить процессы осаждения и кристаллизации и создать антидиффузионный слой на поверхности подложки, предотвращая побочные реакции во время отжига, но обеспечивая хорошую адгезию к ее поверхности, то получение высококачественных поликристаллических слоев YIG будет вполне возможным.

Так, в [11] были получены структуры  $\text{Co}/\text{TiO}_2$  на подложках GaAs и Si. При этом показано, что применение антидиффузионного слоя  $\text{TiO}_2$  предотвращает протекание нежелательных химических реакций и в то же время сохраняет химическую индифферентность подложки по отношению к осаждаемому слою в процессе кристаллизации.

*Цель работы* – получение методом ионно-лучевого распыления-осаждения монокристаллических слоев железо-иттриевого граната (YIG) на сегнетоэлектрических подложках свинецсодержащей PZT-подложки и бессвинцовой керамики BST.

**Экспериментальная часть.** Керамические подложки на основе цирконат-титаната свинца (PZT) и твердых растворов титаната бария–стронция (BST) были синтезированы стандартным методом измельчения и горячего прессования [12]. Подложки были утонены до 400 мкм механическим полированием до субмикронной шероховатости поверхности и обработаны в кислородной плазме СВЧ-разряда. На предварительном этапе на поверхность подложек воздействовали низкоэнергетическими ионами кислорода в течение 20 мин.

Для образцов керамики PZT, содержащей химически активный летучий оксид свинца, необходимо разделить процессы осаждения и кристаллизации и создать антидиффузионный слой на поверхности подложки, предотвращая побочные реакции во время отжига, но обеспечивая хорошую адгезию к ее поверхности. Образцы PZT были подвергнуты ионно-лучевой планаризации [13]

для обеспечения наноразмерной шероховатости керамической поверхности и для создания буферного слоя  $\text{TiO}_2$ .

Планаризация проводилась в два этапа. На первом этапе барьерный слой  $\text{TiO}_2$  толщиной около 0,2 мкм осаждался на керамическую подложку посредством распыления мишени  $\text{Ti}$  ионами  $\text{O}^+$  с энергиями 1,6 кэВ. Затем поверхность с барьерным слоем распылялась в более мягком режиме теми же ионами с энергиями 0,4 кэВ в течение времени, немного превышающем время осаждения слоя  $\text{TiO}_2$ . Цикл планаризации повторялся 2 раза. Затем осаждался слой YIG путем распыления поликристаллической мишени YIG при комнатной температуре смесью ионов аргона и кислорода с энергией 1,5 кэВ при плотности тока  $0,2 \text{ mA/cm}^2$  и давлении  $2,5 \cdot 10^{-2} \text{ Па}$ . Толщина аморфного слоя YIG составила около 1 мкм. Его кристаллизовали отжигом на воздухе при температуре  $820 \text{ }^\circ\text{C}$  в течение 5 мин [13].

Известно, что для бессвинцовых, более химически инертных BST-подложек необходимо создать на поверхности керамики переходной слой, родственной YIG, благодаря которому удастся предотвратить взаимодействие ферромагнитного слоя с сегнетоэлектрической подложкой и обеспечить хорошую адгезию слоя YIG к поверхности подложки. Поэтому получение монолитной гетероструктуры проводилось в два этапа при тех же режимах, что и для керамики PZT. На первом этапе наносился слой  $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  толщиной около 0,5 мкм, затем его кристаллизовали отжигом, после чего поверхность с кристаллизованным слоем распылялась в том же режиме до его толщины около 100 нм. На втором этапе процесс напыления YIG и его отжига повторялся в тех же режимах.

Слои были однородными по толщине с точностью до 10 % на площади до  $10 \text{ см}^2$ , а их катионный состав совпадал со стехиометрическим составом мишени с точностью до 5 % [12].

Характеристики полученных таким образом гетероструктур исследовались с помощью растровой электронной микроскопии (РЭМ) на приборе FEI Helios NanoLab 600 (США). Образцы в поперечном сечении были получены по стандартной методике с использованием сфокусированных пучков ионов галлия с энергией 30 кэВ. Рентгеновские исследования осуществлялись на дифрактометре Bruker D8 Advance (Германия) с использованием  $\text{CuK}_\alpha$ -излучения с длиной волны  $1,5405 \text{ \AA}$ . Рентгенограммы получены в диапазоне углов  $2\theta$   $15\text{--}80^\circ$ . Каждое измерение проводилось с шагом  $0,0133^\circ$  в течение 3 с. Идентификация фаз осуществлялась с использованием Базы данных неорганических кристаллических структур (ICSD). Вибрационный магнитометр универсальной автоматизированной установки Liquid Helium Free High Field Measurement System (Cryogenic LTD, Великобритания) применялся для магнитных исследований гетероструктур в диапазоне магнитных полей  $\pm 1 \text{ Тл}$  при комнатной температуре.

**Результаты и их обсуждение.** На рис. 1 показано поперечное сечение гетероструктур YIG/ $\text{TiO}_x$ /PZT (a) и естественный скол YIG/BST (b). Слой YIG является поликристаллическим и состоит из монокристаллических блоков с характерным размером до 2 мкм.

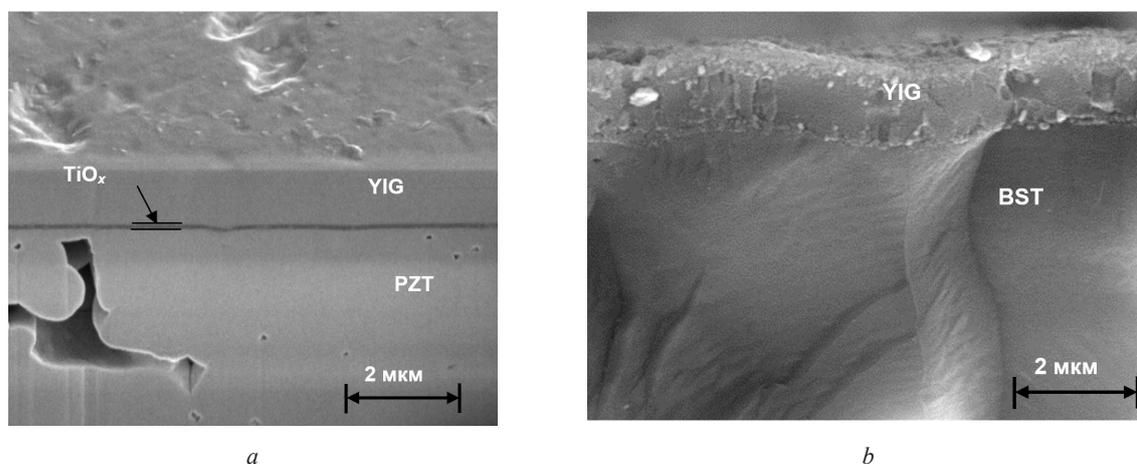


Рис. 1. Поперечное сечение гетероструктур YIG/ $\text{TiO}_x$ /PZT (a) и YIG/BST (b)

Fig. 1. Cross section of YIG/ $\text{TiO}_x$ /PZT (a) and YIG/BST (b) heterostructures

Видно, что гетероструктуры YIG/BST и YIG/TiO<sub>2</sub>/PZT имеют непрерывный плоскопараллельный интерфейс без каких-либо дефектов, связанных со взаимодействием между слоем YIG и подложкой. Между слоем YIG и подложкой PZT хорошо заметна непрерывная темная полоса диоксида титана TiO<sub>2</sub> толщиной 0,2 мкм, который находится в аморфном состоянии, о чем свидетельствует отсутствие его рефлексов на рентгенограмме монокристаллической гетероструктуры YIG/TiO<sub>x</sub>/PZT, приведенной на рис. 2, а. Диоксид титана входит в состав керамики PZT в качестве одного из компонентов твердого раствора, поэтому он не образует каких-либо посторонних фаз с подложкой в виде химических соединений и препятствует их образованию между слоем YIG и подложкой. На рис. 2, б показана рентгенограмма монокристаллической гетероструктуры YIG/BST. Рентгенограмма слоя YIG для обоих случаев содержит узкие интенсивные отражения, которые можно индексировать по кубической симметрии. В этом случае параметр решетки для слоя субмикронной толщины составляет 1,2378 нм, что немного превышает параметр объемных монокристаллов YIG (1,2376 нм [9]).

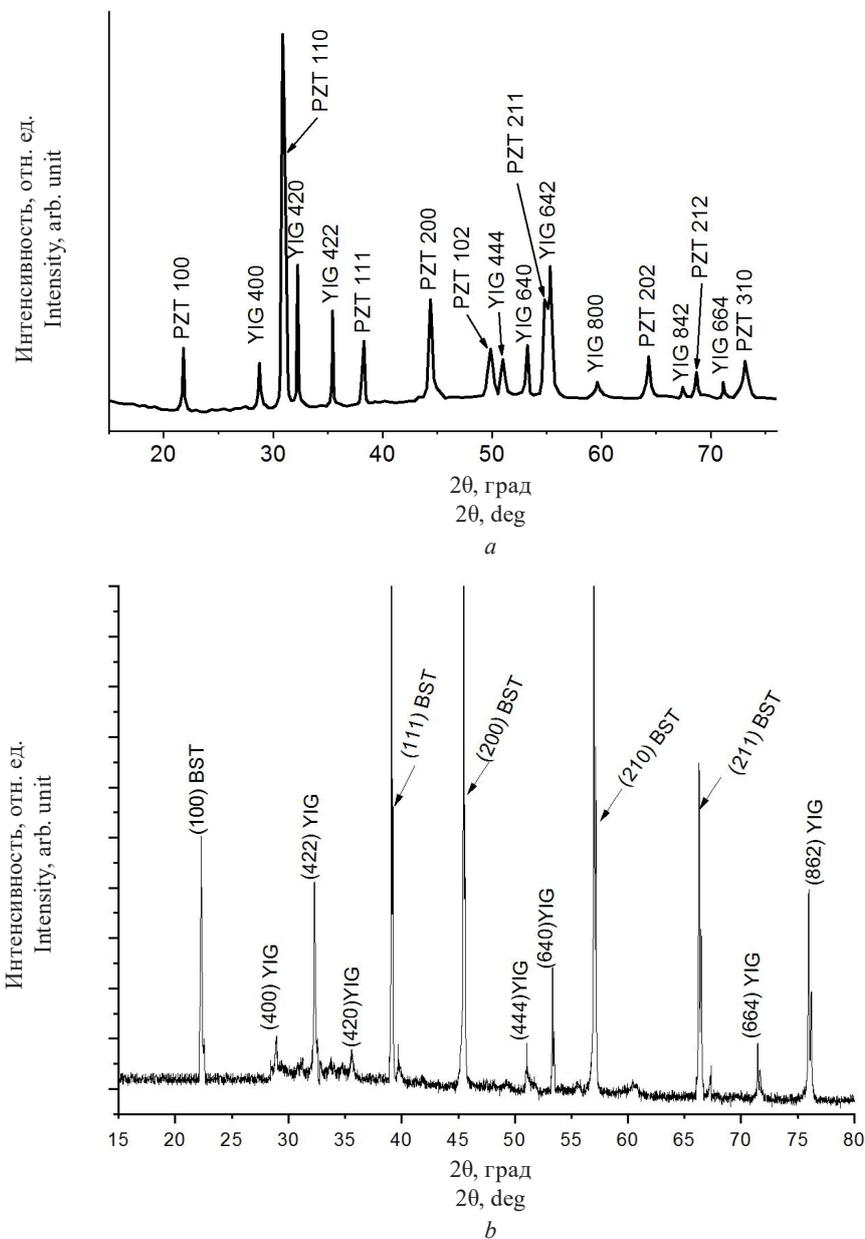


Рис. 2. Рентгенограммы структур YIG/TiO<sub>x</sub>/PZT (а) и YIG/BST (б)

Fig. 2. X-ray diffraction pattern of YIG/TiO<sub>x</sub>/PZT (a) and YIG/BST (b) structures

Несколько смещенные от первоначального положения пики подложки свидетельствуют, что в данном случае подложки, как PZT, так и BST, под слоем YIG толщиной 2 мкм находятся в напряженном состоянии. Следует обратить внимание на то, что при получении слоев феррит-гранатов методом ионно-лучевого распыления кристаллическая решетка всегда расширяется. Это можно объяснить как наличием некоторого количества собственных примесей в ней, так и тем, что рост феррит-граната происходит не по эпитаксиальному механизму сплошным слоем по всей площади, а на отдельных разупорядоченных зернах керамики за счет сильной адгезии растущей пленки к подложке. В этом случае не происходит упругой релаксации механических напряжений с ростом толщины слоя.

В таблице представлены значения дифракционных углов  $2\theta$  рефлексов от подложек PZT и BST, полученные из рентгенограммы (см. рис. 2), отвечающие им табличные значения, а также разница  $\Delta\theta$  в углах между ними. В последней колонке приведено относительное искажение межплоскостных расстояний  $\Delta a/a$ , вычисленное по формуле

$$\Delta a/a = -\text{ctg}\theta\Delta\theta, \quad (1)$$

полученной дифференцированием условия Вульфа–Брэггов для максимумов рентгеновской дифракции с соблюдением правил приближенного вычисления.

**Значения дифракционных углов  $2\theta$  рефлексов от подложки и слоя YIG и относительные искажения  $\Delta a/a$  межплоскостных расстояний**

**Diffraction angles  $2\theta$  of reflections from the substrate and YIG layer and relative distortions  $\Delta a/a$  of the lattice parameters**

Подложка	Рефлекс	$2\theta$ , град		$\Delta a/a$	$\Delta a/a$ , %
		На рентгенограмме, $2\theta$	Табличное значение, $2\theta_{\text{таб}}$		
PZT	100	21,95	22,1	0,007	0,675
	110	30,9	31,0	0,003	0,316
	111	38,27	38,4	0,004	0,352
	102	49,3	49,5	0,004	0,380
	202	64,8	64,6	-0,003	0,275
BST	100	22,1	22,3	0,009	0,894
	111	39,3	39,12	-0,004	0,440
	200	45,71	45,48	-0,005	0,476
	210	56,35	56,52	0,003	0,277
	211	66,45	66,28	-0,002	0,226

Как видно из таблицы, искажения параметров кристаллической решетки составляют  $< 1\%$ , что нельзя объяснить присутствием большого количества чужеродных примесей. Это подтверждает предположение о бездиффузионном механизме кристаллизации YIG [16] в наших условиях. Однако искажение параметров кристаллической решетки для структуры YIG/BST больше, чем для структуры YIG/TiO<sub>x</sub>/PZT, что объясняется наличием аморфного буферного слоя TiO<sub>x</sub>, который подавляет механические напряжения, возникающие на интерфейсе поликристаллическая подложка/поликристаллическая пленка.

Данные рентгеноструктурного анализа полностью коррелируют с результатами элементного анализа полученных структур методом характеристического рентгеновского излучения. Исходя из оценки спектров наложения отдельных элементов можно сделать вывод, что состав монолитных гетероструктур соответствует YIG/TiO<sub>x</sub>/PZT и YIG/BST. Это свидетельствует об отсутствии посторонних химических соединений, наличие которых может привести к существенному ухудшению магнитных свойств.

Данные магнитных измерений и внешний вид петель намагничивания слоя YIG для гетероструктур YIG/TiO<sub>x</sub>/PZT и YIG/BST (рис. 3) свидетельствуют о том, что слой YIG является сплошным и характеризуется намагниченностью насыщения 100 Гс для YIG/TiO<sub>x</sub>/PZT и 120 Гс

для YIG/BST. Эффективная намагниченность насыщения слоя YIG составила более  $0,7 M_{SAT}$  (где намагниченность насыщения монокристаллов YIG составляет  $M_{SAT} = 139$  Гс) для YIG/TiO<sub>x</sub>/PZT и более  $0,85 M_{SAT}$  – для YIG/BST.

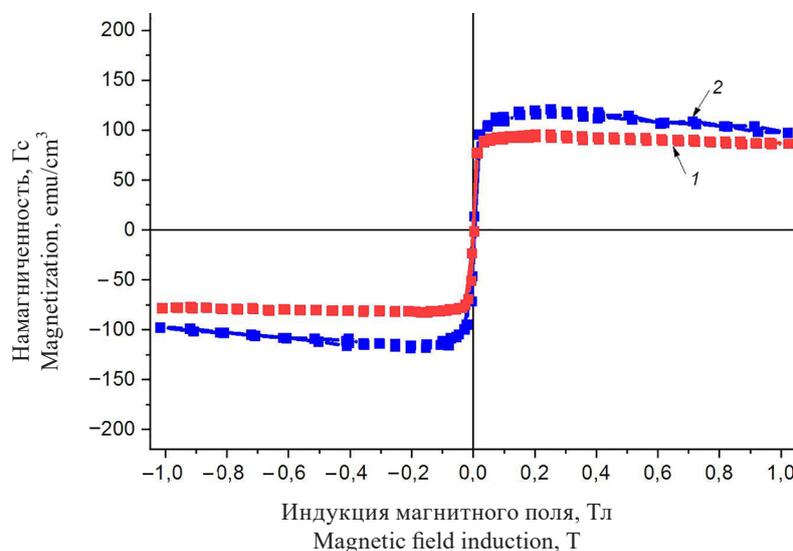


Рис. 3. Петли намагничивания слоя YIG для структуры YIG/TiO<sub>x</sub>/PZT (1) и YIG/BST (2) при комнатной температуре. Поле направлено параллельно плоскости образца

Fig. 3. Magnetization loops of the YIG layer for the YIG/TiO<sub>x</sub>/PZT (1) and YIG/BST (2) structures at room temperature. The field is directed parallel to the sample plane

Слои YIG на подложках PZT обладают большей магнитной неоднородностью по сравнению с аналогичными слоями на BST, которая возникает в результате взаимодействия буферного слоя TiO<sub>2</sub> с YIG. При наличии барьерного слоя одновременно идет кристаллизация слоя YIG на подложке PZT при отжиге от поверхности и подложки. Так как внутренняя энергия слой/поверхность меньше, чем подложка/слой, то у поверхности образуются большие кристаллиты, а у подложки формируется менее структурно совершенный слой. В результате этого кристаллиты прорастают в буферный слой, что приводит к увеличению дефектности и, следовательно, магнитной неоднородности. Улучшение магнитных свойств на подложках BST связано с двустадийным формированием слоя YIG. После первой стадии осаждения-распыления YIG в качестве подложки выступает уже не чистый BST, а BST с переходным слоем кристаллизованного слоя YIG, который в данном случае выступает как подложка для вновь напыляемого слоя и является для него близким по структурным и физическим свойствам. Таким образом происходит понижение свободной энергии на границе подложка/слой, в результате чего фронт кристаллизации идет не от поверхности, а от интерфейсной области, что влечет за собой уменьшение дефектности, которую привносит подложка в осаждаемый на нее материал. Это приводит к большей магнитной однородности YIG/BST по сравнению с аналогичными слоями на PZT.

Узкая ширина линии ферромагнитного резонанса (ФМР)  $\Delta H$  (рис. 4, *a*) также позволяет судить о магнитной однородности образца по площади, что в свою очередь свидетельствует и о структурной однородности. На рис. 4, *a* приведена типичная зависимость амплитуды ФМР от внешнего магнитного поля на частоте 9,45 ГГц для слоя YIG толщиной 2 мкм с буферным слоем TiO<sub>2</sub> на керамической подложке PZT. Частота магнитного резонанса слоя YIG (9,45 ГГц) совпадает с результатами амплитудно-частотной характеристики для образца YIG/BST (рис. 4, *b*), что позволяет судить об идентичности магнитных свойств полученных структур.

По ширине резонанса  $\Delta H$  на частоте ФМР можно оценить безразмерный параметр демпфирования Гильберта  $\alpha$ . Согласно [15], он удовлетворяет следующему соотношению:  $\Delta H \approx 2\pi f\alpha/\gamma$ , где  $f$  – частота ФМР, а  $\gamma = 1,7588 \cdot 10^7 \text{ Э}^{-1}$  – гиромагнитное отношение. В общем случае на параметр  $\alpha$  может влиять ряд факторов, в том числе неоднородности слоя, параметры подложки и наличие

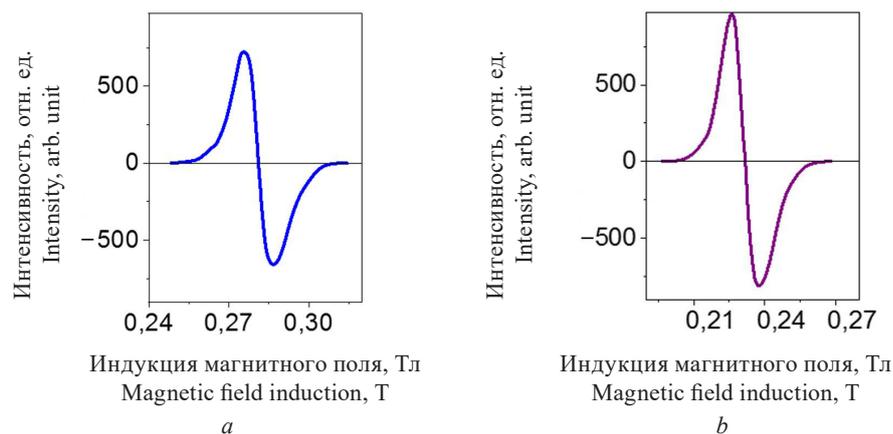


Рис. 4. Зависимость интенсивности резонанса от магнитного поля резонанса на частоте 9,45 ГГц для YIG/TiO<sub>x</sub>/PZT (a) и YIG/BST (b);  $\Theta = 90^\circ$

Fig. 4. Dependence of the resonance intensity on the magnetic field of the resonance at a frequency of 9.45 GHz for YIG/TiO<sub>x</sub>/PZT (a) and YIG/BST (b);  $\Theta = 90^\circ$

поликристаллической структуры. Для рассматриваемых образцов во внешнем магнитном поле, приложенном вдоль их поверхности, ширина линии ФМР  $\Delta H$  лежит в диапазоне 50–100 Э и резонансное поле составляет  $H_r = 470$  мТ. Это значение соответствует  $\alpha = 1,48 \cdot 10^{-3}$ . Такая ширина линии ФМР достаточна для приборов с характерными размерами 100 мкм, что соответствует современным полевым транзисторам с магнитоуправляемым затвором.

**Заключение.** В работе были получены структуры YIG толщиной 2 мкм на сегнетоэлектрических керамических подложках PbZr<sub>0,45</sub>Ti<sub>0,55</sub>O<sub>3</sub> и Ba<sub>0,4</sub>Sr<sub>0,6</sub>TiO<sub>3</sub>. Показано, что ионно-лучевое распыление-осаждение в сочетании с предварительной подготовкой поверхности подложек и создание переходных барьерных слоев позволяют в дальнейшем получить монолитную структуру YIG на керамике PZT и BST.

Представленные результаты рентгеноструктурного анализа показывают, что слой YIG на подложках находится в напряженном состоянии. Сканирующая электронная микроскопия в сочетании с методом сфокусированного ионного пучка свидетельствует о формировании высококачественного плоскопараллельного интерфейса YIG/подложка.

Полученные структуры имеют стабильный химический состав, четкий плоскопараллельный интерфейс со сплошным слоем YIG и обладают высокими значениями магнитных характеристик, что делает их привлекательными для использования в логических схемах на основе спиновых волн с малым рассеиванием, элементах памяти, а также электрически управляемых устройствах СВЧ-диапазона.

### Список использованных источников

1. Ishak, W. S. Magnetostatic wave technology: a review / W. S. Ishak // Proc. IEEE. – 1988. – Vol. 76, № 2. – P. 171–187. <https://doi.org/10.1109/5.4393>
2. Стрейнтроника – новое направление микро- и нанoeлектроники и науки о материалах / А. А. Бухараев [и др.] // Успехи физ. наук. – 2018. – Т. 188, № 12. – С. 1288–1330. <https://doi.org/10.3367/UFNr.2018.01.038279>
3. Gurevich, A. G. Magnetization Oscillations and Waves / A. G. Gurevich, G. A. Melkov. – London: CRC, 1996. – 464 p. <https://doi.org/10.1201/9780138748487>
4. Вашковский, А. В. Магнитостатистические волны в электронике сверхвысоких частот: учеб. пособие для физ. спец. ун-тов / А. В. Вашковский, В. С. Стальмахов, Ю. Г. Шараевский; Саратов. гос. ун-т им. Н. Г. Чернышевского. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1993. – 314 с.
5. Magnon Straintronics: Reconfigurable Spin-Wave Routing in Strain-Controlled Bilateral Magnetic Stripes / A. V. Sadovnikov [et al.] // Phys. Rev. Lett. – 2018. – Vol. 120. – Art. ID 257203. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.120.257203>
6. Interface magnetoelectric effect in elastically linked Co/PZT/Co layered structures / A. I. Stognij [et al.] // J. Magn. Magn. Mater. – 2019. – Vol. 485. – P. 291–296. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.04.006>

7. Preparation and investigation of the magnetoelectric properties in layered cermet structures / A. I. Stognij [et al.] // *Ceram. Int.* – 2019. – Vol. 45, iss. 10. – P. 13030–13036. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.03.234>
8. Выращивание пленок  $Y_3Fe_5O_{12}$  на Si с буферными слоями  $AlO_x$  и  $SiO_2$  методом ионно-лучевого распыления / А. И. Стогний [и др.] // *Неорган. материалы.* – 2017. – Т. 53, № 10. – С. 1093–1098.
9. Magnetic properties, spin waves and interaction between spin excitations and 2D electrons in interface layer in  $Y_3Fe_5O_{12}/AlO_x/GaAs$ -heterostructures / L. V. Lutsev [et al.] // *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 2017. – Vol. 51, № 35. – Art. ID 355002 (8 p). <https://doi.org/10.1088/1361-6463/aad41b>
10. Synthesis, magnetic properties and spin-wave propagation in thin  $Y_3Fe_5O_{12}$  films sputtered on GaN-based substrates / A. I. Stognij [et al.] // *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 2015. – Vol. 48, № 48. – Art. ID 485002 (8 p). <https://doi.org/10.1088/0022-3727/48/48/485002>
11. Stognij, A. I. Ion-beam engineering of Co/TiO<sub>2</sub> multilayer nanostructures / A. I. Stognij, M. V. Pashkevich, N. N. Novitskii // *Tech. Phys. Lett.* – 2010. – Vol. 36. – P. 426–429. <https://doi.org/10.1134/S1063785010050111>
12. Magnetoelectric effects in porous ferromagnetic-piezoelectric bulk composites: Experiment and theory / V. M. Petrov [et al.] // *Phys. Rev. B: Condens. Matter.* – 2007. – Vol. 75. – Art. ID 174422. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.75.174422>
13. Влияние состояния границ раздела на величину магнитоэлектрического эффекта в пленках Co(Ni) на подложках  $PbZr_{0.45}Ti_{0.55}O_3$  и GaAs / А. И. Стогний [и др.] // *Неорганические материалы.* – 2016. – Т. 52, № 10. – С. 1141–1147.
14. Stognij, A. I. The synthesis of metal oxide films from compound powder targets / A. I. Stognij, V. V. Tokarev, Yu. N. Mitin // *Mater. Res. Soc. Proc.* – 1991. – Vol. 236. – P. 331–334. <https://doi.org/10.1557/PROC-236-331>
15. Spin precession modulation in a magnetic bilayer / A. Stupakiewicz [et al.] // *Appl. Phys. Lett.* – 2012. – Vol. 101. – Art. ID 262406. <https://doi.org/10.1063/1.4773508>
16. Enhanced Nonreciprocity of Magnetostatic Surface Waves in Yttrium-Iron-Garnet Films Deposited on Silicon Substrates by Ion-Beam Evaporation / V. K. Sakharov [et al.] // *IEEE Magn. Lett.* – 2017. – Vol. 8. – Art. ID 3704105 (5 p). <https://doi.org/10.1109/LMAG.2017.2659638>

## References

1. Ishak W. S. Magnetostatic wave technology: a review. *Proceedings of the IEEE*, 1988, vol. 76, no. 2, pp. 171–187. <https://doi.org/10.1109/5.4393>
2. Bukharaev A. A., Zvezdin A. K., Pyatakov A. P., Fetisov Y. K. Straintronics: a new trend in micro- and nanoelectronics and materials science. *Physics Uspekhi*, 2018, vol. 61, no. 12, pp. 1175–1212. <https://doi.org/10.3367/UFNe.2018.01.038279>
3. Gurevich A. G., Melkov G. A. *Magnetization Oscillations and Waves*. London, CRC, 1996. 464 p. <https://doi.org/10.1201/9780138748487>
4. Vashkovskii A. V., Stal'makhov V. S., Sharaevskii Yu. P. *Magnetostatic Waves in Microwave Electronics*. Saratov, Saratov State University Publ., 1993. 314 p. (in Russian).
5. Sadovnikov A. V., Grachev A. A., Sheshukova S. E., Sharaevskii Yu. P., Serdobintsev A. A., Mitin D. M., Nikitov S. A. Magnon Straintronics: Reconfigurable Spin-Wave Routing in Strain-Controlled Bilateral Magnetic Stripes. *Physical Review Letters*, 2018, vol. 120, art. ID 257203. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.120.257203>
6. Stognij A. I., Novitskii N. N., Trukhanov S. V., Trukhanov A. V., Panina L. V., Sharko S. A., Serokurova A. I. [et al.]. Interface magnetoelectric effect in elastically linked Co/PZT/Co layered structures. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2019, vol. 485, pp. 291–296. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.04.006>
7. Stognij A. I., Sharko S. A., Serokurova A. I., Trukhanov S. V., Trukhanov A. V., Panina L. V., Ketsko V. A. [et al.]. Preparation and investigation of the magnetoelectric properties in layered cermet structures. *Ceramics International*, 2019, vol. 45, no. 10, pp. 13030–13036. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.03.234>
8. Stognij A. I., Novitskii N. N., Golikova O. L., Bepalov A. V., Gieniusz R., Maziewski A., Stupakiewicz A. [et al.]. Growth of  $Y_3Fe_5O_{12}$  films on Si with  $AlO_x$  and  $SiO_2$  buffer layers by ion beam sputtering. *Inorganic Materials*, 2017, vol. 53, no. 10, pp. 1069–1074. <https://doi.org/10.1134/S0020168517100156>
9. Lutsev L. V., Stognij A. I., Novitskii N. N., Gieniusz R. Magnetic properties, spin waves and interaction between spin excitations and 2D electrons in interface layer in  $Y_3Fe_5O_{12}/AlO_x/GaAs$ -heterostructures. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2017, vol. 51, no. 35, art. ID 355002 (8 p). <https://doi.org/10.1088/1361-6463/aad41b>
10. Stognij A., Lutsev L., Novitskii N., Bepalov A., Golikova O., Ketsko V., Gieniusz R., Maziewski A. Synthesis, magnetic properties and spin-wave propagation in thin  $Y_3Fe_5O_{12}$  films sputtered on GaN-based substrates. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2015, vol. 48, no. 48, art. ID 485002 (8 p). <https://doi.org/10.1088/0022-3727/48/48/485002>
11. Stognij A. I., Pashkevich M. V., Novitskii N. N. Ion-beam engineering of Co/TiO<sub>2</sub> multilayer nanostructures. *Technical Physics Letters*, 2010, vol. 36, pp. 426–429. <https://doi.org/10.1134/S1063785010050111>
12. Petrov V. M., Srinivasan G., Laletin V. M., Bichurin M. I., Tuskov D. S., Poddubnaya N. N. Magnetoelectric effects in porous ferromagnetic-piezoelectric bulk composites: Experiment and theory. *Physical Review B: Condensed Matter*, 2007, vol. 75, art. ID 174422. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.75.174422>

13. Stognij A. I., Novitskii N. N., Ketsko V. A., Sharko S. A., Poddubnaya N. N., Laletin V. M., Bespalov A. V. [et al.]. Influence of the State of Interfaces on the Magnitude of the Magnetoelectric Effect in Co(Ni) Films on  $\text{PbZr}_{0.45}\text{Ti}_{0.55}\text{O}_3$  and GaAs Substrates. *Inorganic Materials*, 2016, vol. 52, no. 10, pp. 1070–1076. <https://doi.org/10.1134/S0020168516100162>
14. Stognij A. I., Tokarev V. V., Mitin Yu. N. The synthesis of metal oxide films from compound powder targets. *Materials Research Society Proceedings*, 1991, vol. 236, pp. 331–334. <https://doi.org/10.1557/PROC-236-331>
15. Stupakiewicz A., Pashkevich M., Maziewski A., Stognij A., Novitskii N. Spin precession modulation in a magnetic bilayer. *Applied Physics Letters*, 2012, vol. 101, art. ID 262406. <https://doi.org/10.1063/1.4773508>
16. Sakharov V. K., Khivintsev Yu. V., Vysotskii S. L., Stognij A. I., Filimonov Y. A. Enhanced Nonreciprocity of Magnetostatic Surface Waves in Yttrium-Iron-Garnet Films Deposited on Silicon Substrates by Ion-Beam Evaporation. *IEEE Magnetism Letters*, 2017, vol. 8, art. ID 3704105 (5 p.). <https://doi.org/10.1109/LMAG.2017.2659638>