

**ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ /
PHYSICAL CHARACTERISTICS AND THEIR STUDY**

Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2024. Т. 27, № 1. С. 96—102.

DOI: 10.17073/1609-3577j.met202310.561

УДК 621.315

**Тонкие пленки $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}/\text{Ba}_{0,8}\text{Sr}_{0,2}\text{TiO}_3$:
синтез и перспективы интеграции**© 2024 г. М. С. Афанасьев¹, Е. И. Гольдман¹, **А. И. Стогний²**, Г. В. Чучева¹✉

¹ *Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова
Российской академии наук (фрязинский филиал),
пл. Введенского, д. 1, Фрязино, Московская обл., 141120, Российская Федерация*

² *Научно–практический центр
Национальной академии наук Беларуси по материаловедению,
ул. П. Бровки, д. 19, Минск, 220072, Республика Беларусь*

✉ Автор для переписки: gvc@ms.ire.rssi.ru

Аннотация. В статье рассмотрено получение композитной системы, состоящей из тонких ферромагнитных ($\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$) и сегнетоэлектрических ($\text{Ba}_{0,8}\text{Sr}_{0,2}\text{TiO}_3$) пленок на кремниевых подложках, полученных методом ионно–лучевого осаждения и высокочастотного распыления. Для согласования параметров кристаллических решеток и коэффициентов теплового расширения, а также предотвращения химического взаимодействия материалов пленки и подложки в работе использован буферный слой диоксида титана TiO_2 (один из оксидов исходного состава мишени), параметры которого хорошо согласуются с решеткой титаната бария стронция. Исследуются состав, структура и микроструктурные свойства пленок. Показана возможность применения не только в микроэлектронике, но более всего — в микроэлектромеханике, особенно для получения сегнетоэлектрических мембран на кремнии, интегрированных в состав устройств микросистемной техники.

Ключевые слова: сегнетоэлектрические пленки, мембраны, ферромагнитные пленки, ионно–лучевое осаждение, ВЧ–распыление, атомно–силовая микроскопия, энергодисперсионная спектроскопия

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22–19–00493, <https://rscf.ru/project/22-19-00493/>

Для цитирования: Афанасьев М.С., Гольдман Е.И., **Стогний А.И.**, Чучева Г.В. Тонкие пленки $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}/\text{Ba}_{0,8}\text{Sr}_{0,2}\text{TiO}_3$: синтез и перспективы интеграции. *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники.* 2024; 27(1): 96—102. <https://doi.org/10.17073/1609-3577j.met202310.561>

Thin films $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}/\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3$: synthesis and integration prospects

M. S. Afanasiev¹, E. I. Goldman¹, A. I. Stogniy², G. V. Chucheva¹✉

¹ *Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics
of the Russian Academy of Sciences (Fryazino Branch),
1 Vvedenskogo Sq., Fryazino, Moscow Region 141120, Russian Federation*

² *Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Materials
Science, 19 Petrusya Brovki Str., Minsk 220072, Republic of Belarus*

✉ Corresponding author: gvc@ms.ire.rssi.ru

Abstract. The work is devoted to the preparation of a composite system consisting of thin ferromagnetic films $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ and ferroelectric $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3$ on silicon substrates. Films were obtained by ion-beam deposition and high-frequency sputtering. To coordinate parameters of crystal lattices and thermal expansion coefficients, as well as to prevent chemical interaction of film and substrate materials, a buffer layer of TiO_2 titanium dioxide (one of oxides of the initial composition of the target) is used, parameters of which are in good agreement with the lattice of strontium barium titanate. The composition, structure and microstructural properties of films are investigated. The possibility of application is shown not only in microelectronics, but most of all in microelectromechanics, especially for the production of ferroelectric membranes on silicon integrated into the devices of microsystem technology.

Keywords: ferroelectric films, membranes, ferromagnetic films, ion-beam deposition, high-frequency sputtering, atomic force microscopy, energy-dispersive spectroscopy

Acknowledgements: The study was carried out at the expense of the grant of the Russian Science Foundation, No. 22-19-00493, <https://rscf.ru/project/22-19-00493/>

For citation: Afanasiev M.S., Goldman E.I., Stogniy A.I., Chucheva G.V. Thin films $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}/\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3$: synthesis and integration prospects. *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki = Materials of Electronics Engineering*. 2024; 27(1): 96–102. <https://doi.org/10.17073/1609-3577j.met202310.561>

Введение

Проводимые интенсивные исследования сегнетоэлектрических материалов позволили значительно расширить область их практического применения [1]. Однако, потенциал этих материалов, в настоящее время, реализован не в полной мере, что связано с отсутствием воспроизводимой технологии получения структурно-совершенных эпитаксиальных пленок. Поэтому развитие технологии формирования наноразмерных сегнетоэлектрических слоев является актуальной задачей.

Для создания приборов СВЧ-диапазона на базе пленочных сегнетоэлектриков необходимы пленки, обладающие одновременно достаточно сильной зависимостью диэлектрической проницаемости от приложенного поля и низкими потерями в СВЧ-диапазоне [2]. Одним из наиболее перспективных на сегодня материалов по высокому уровню диэлектрической нелинейности и низкому

уровню диэлектрических потерь является состав $\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$ (BST) [3]. На базе пленок BSTO реализованы такие СВЧ-устройства, как фазовращатели [4], ведется активная разработка фильтров, линий задержки и др.

С расширением области применения все больший интерес вызывают композитные системы, такие как сегнетоэлектрические/ферромагнитные гетероструктуры [5, 6]. Существуют два способа переключения поляризации в этих объектах: 1) настройка ферромагнитного резонанса (FMR) ферритовых материалов магнитным полем [7], 2) настройка ферроэлектрических материалов электрическим полем [8]. Скорость перестройки сегнетоэлектриков достаточно высока, но частотный диапазон узок [9, 10], в то время как магнитная перестройка ферритового материала может обеспечить более широкий диапазон перестройки, но меньшую скорость. Композитные материалы с сосуществованием сегнетоэлектрических и ферромагнитных

свойств могут нивелировать недостатки друг друга и обуславливать эффект двойной настройки за счет одновременного приложения электрического и магнитного поля.

В качестве ферромагнитной составляющей наиболее перспективно использование пленок железоиттриевого граната. Ранее было показано [11—13], что железо-иттриевый гранат (YIG) обладает очень малой шириной линии ферромагнитного резонанса и чрезвычайно слабым затуханием спиновых волн [14]. В большинстве случаев усилия по построению сегнетоэлектрических/ферритовых структур были сосредоточены на соединении YIG с сегнетоэлектрическими слоями либо в виде монокристаллов, либо керамики [15, 16]. По сравнению с объемными композитами тонкие пленки обладают многими уникальными преимуществами, такими как точный контроль несоответствия решеток и толщины в атомном масштабе. В последние несколько лет широко исследуются сегнетоэлектрические поликристаллические слои из-за более высокой перестраиваемости и добротности в микроволновом диапазоне, чем у монокристаллических аналогов [17, 18]. В работе [19] показана возможность использования в спин-волновых устройствах композитной пленки BSTO/YIG, полученной на подложке гадолиний-галлиевого граната (ГГГ).

Однако это справедливо, если выполнены условия эпитаксиального сопряжения пленки со структурообразующей подложкой и оптимизированы условия роста. Это существенно ограничивает интеграцию таких структур с полупроводниковыми технологиями. Нерешенная задача получения гетероэпитаксиальных структур, состоящих из ферромагнитных/сегнетоэлектрических (ФМ/СЭ) пленок с сохранением основных физических свойств каждого слоя и с гладкими границами раздела до сих пор ограничивала реализацию таких структур. Поэтому вопрос получения и исследований композитных пленок BSTO/YIG на несогласованных подложках, в том числе кремниевых, остается открытым.

Экспериментальная часть

Одна из главных задач при создании гетероструктур на основе наноразмерных сегнетоэлектрических/ферромагнитных пленок — обеспечение слоевого механизма роста при значительном рассогласовании параметров решетки. Такие пленки должны обладать высоким структурным совершенством, а также нанометровой шероховатостью, что позволит наносить планарные электроды с субмикронными диэлектрическими зазорами и, следовательно, устанавливать рабочие напряжения также в диапазоне единиц вольт. Тонкие пленки феррита YIG, сегнетоэлектрического ком-

позита BSTO и промежуточного слоя TiO_x на подложках Si были получены методом ионно-лучевого осаждения и высокочастотного (ВЧ) распыления. Распыление поликристаллической мишени YIG диаметром 76 мм осуществлялось пучком ионов смеси аргона и кислорода с энергией 1,5 кэВ при плотности тока $0,2 \text{ мА/см}^2$. Содержание кислорода в газовой смеси составляло 10 %. Предварительно мишень распылялась в течение 2 ч для ее очистки и достижения стационарных условий распыления-осаждения. Осаждение распыленного потока с мишени проводилось на поверхность подложек при давлении $2,5 \cdot 10^{-2} \text{ Па}$ и комнатной температуре. Скорость осаждения составляла 2,5 нм/мин. В основном получали слои YIG толщиной ~300 нм. После осаждения пленки были аморфными. Кристаллизация объектов осуществлялась путем их отжига на воздухе при температуре 850 °С в течение 5 мин. Неоднородность пленок на площади до 10 см^2 по толщине не превышала 10 %, а их катионный состав соответствовал стехиометрического состава мишени с точностью не хуже 5 %.

Схема изготовленной гетероструктуры представлена на рис. 1.

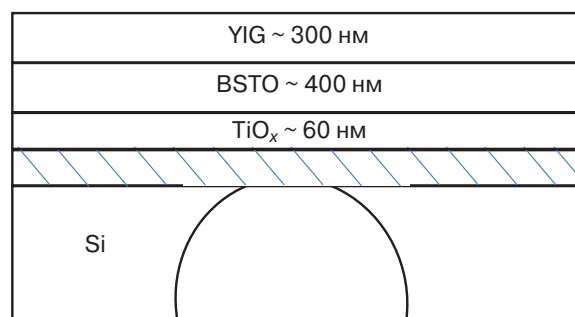


Рис. 1. Схема композитной гетероструктуры на основе тонких пленок YIG/BSTO

Fig. 1. Schematic diagram of the composite heterostructure based on YIG/BSTO thin films

На первом этапе на пластинах кремния методом ионно-лучевого осаждения формировался наноразмерный слой диоксида титана с оптическими (а следовательно — диэлектрическими и кристаллографическими) свойствами, близкими к свойствам анатаза. TiO_2 толщиной 60 нм служит как диффузионный барьер и предотвращает образование силицидов на поверхности. Для осаждения пленок BSTO (толщиной ~400 нм) использовался метод ВЧ распыления стехиометрических мишеней того же состава при повышенных давлениях кислорода. Условия напыления пленок BSTO: давление кислорода во время процесса напыления 60 Па; расстояние между мишенью и подложкой 10 мм; температура подложки 620 °С. При этих условиях скорость роста пленки составляла 6,0 нм/мин.

Последующее нанесение металлооксидного слоя на поверхность сформированной пленки BSTO

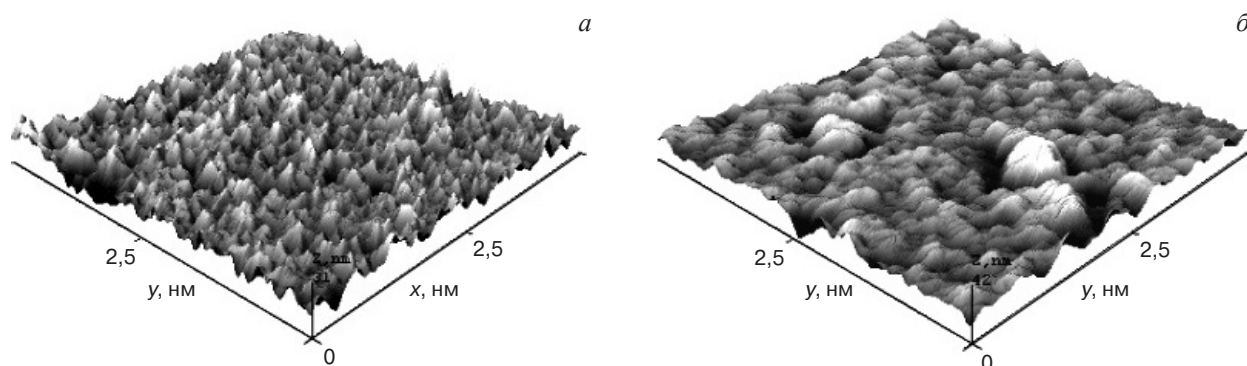


Рис. 2. АСМ-изображение поверхности пленки BST до планаризации (а) и после (б)

Fig. 2. AFM image of the BST film surface before planarization (a) and after (b)

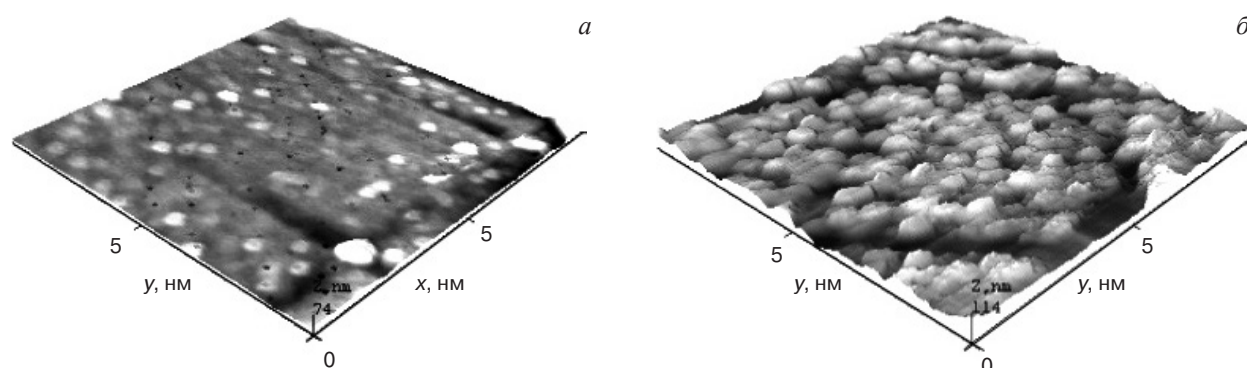


Рис. 3. Морфология поверхности пленки YIG до отжига (а) и после (б)

Fig. 3. Surface morphology of the YIG film before annealing (a) and after (b)

методом ионно-лучевого распыления является технологической проблемой, которая возникает из-за высокого уровня шероховатости поверхности керамики и несоответствия кристаллических решеток. Для предотвращения образования межкристаллитных областей применялось повторное распыление-осаждение слоев титана бария с постоянно уменьшаемой толщиной одновременно с удалением в процессе распыления BSTO до нужной толщины. Планаризация неровностей рельефа поверхности сформированной поликристаллической пленочной гетероструктуры проводилась посредством нанесения субмикронного слоя титаната бария методом ионно-лучевого распыления в атмосфере кислорода мишени. Затем исходная гетероструктура утоньшалась с поверхностным слоем титаната бария методом бездефектного ионно-лучевого распыления ионами кислорода в атмосфере кислорода до получения гетероструктуры требуемой наноразмерной толщины. Перечисленные операции приводили к сглаживанию рельефа поверхности в целом. Максимальное сглаживание наблюдалось при трехкратном применении метода. Результат применения планаризации показан на рис. 2.

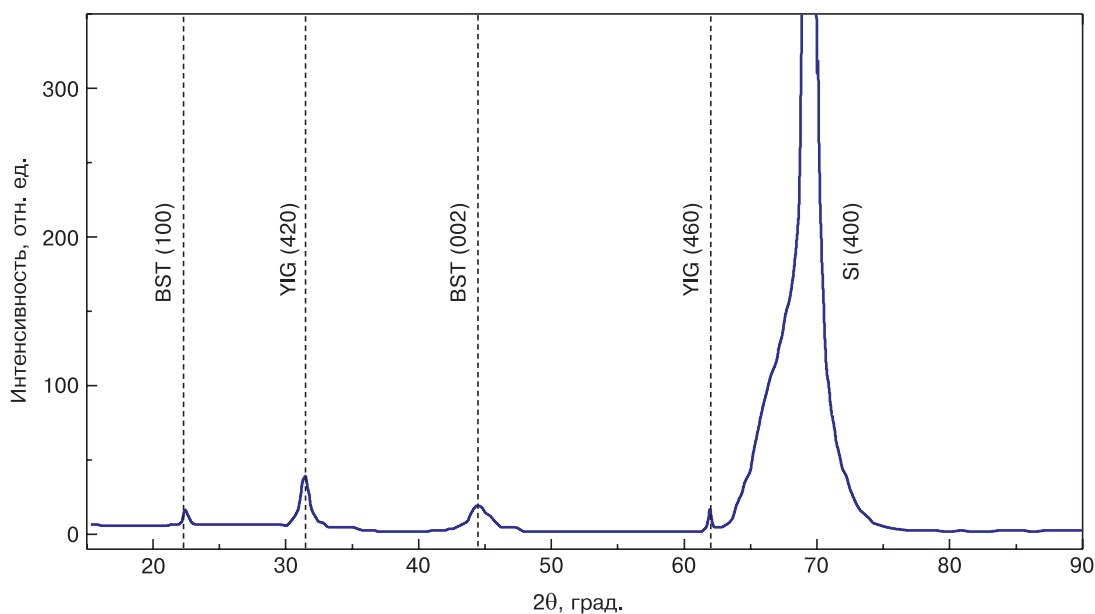
Методы атомно-силовой микроскопии (АСМ) дают представление об изменениях, происходящих с поверхностью под воздействием ионного пучка. В целом наблюдается улучшение качества поверх-

ности пленки BSTO после планаризации (рис 2, б): рельеф поверхности становится более гладким, а подложка со структурой приобретает плоскопараллельную форму.

На последнем этапе пленки YIG толщиной ~300 нм были получены посредством распыления соответствующей мишени ионами Ag и подвергнуты последующему отжигу при 820 °C в течение 5 мин. Рентгенофазовый анализ (РФА) полученных образцов осуществляли на дифрактометре Bruker Advance D8 ($\text{CuK}\alpha$ -излучение) в интервале $2\theta = 10^\circ\text{--}90^\circ$ с шагом сканирования 0,0133°. Морфологию и состав гетероструктуры изучали с помощью растровой электронной микроскопии с приставкой EDX (Carl Zeiss, Германия) и методом атомно-силовой микроскопии на зондовом сканирующем микроскопе NanoEducator (производитель NT-MDT, РФ).

Результаты и их обсуждение

Морфология композитных пленок YIG/BSTO/ TiO_x/Si до (а) и после (б) отжига YIG показана на рис. 3. На поверхности YIG появляется кристалличность, что в сочетании с рентгенограммой (рис. 4) показывает, что композитные пленки хорошо кристаллизуются при сосуществовании перовскитных BSTO и кубических фаз YIG на подложках TiO_x/Si в которых слой YIG кристал-

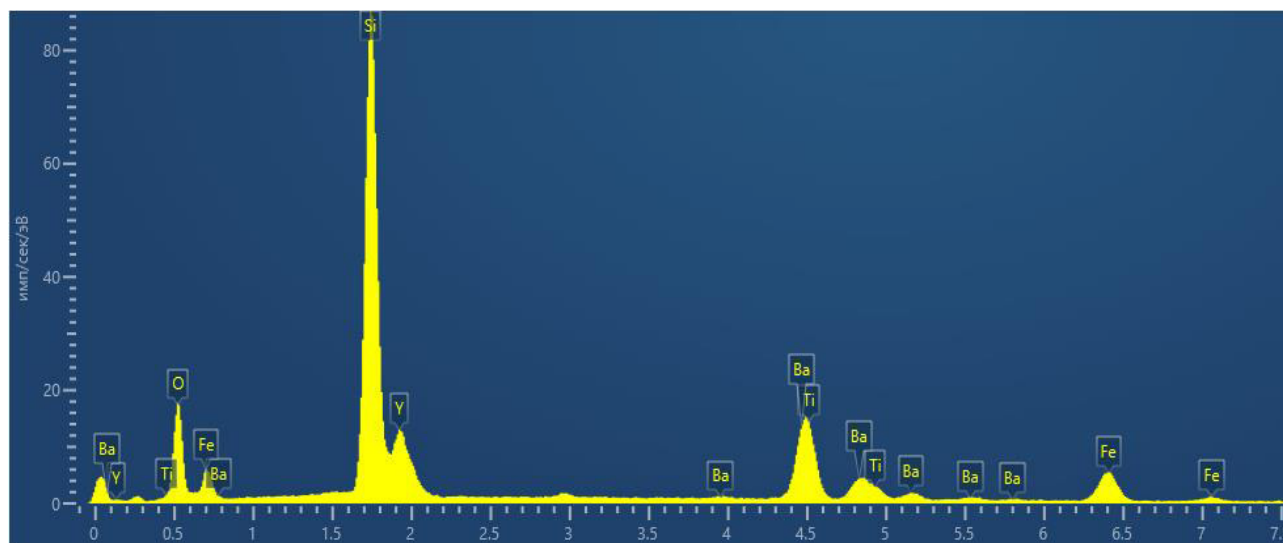
Рис. 4. Рентгенограмма гетероструктуры YIG/BSTO/TiO_x/SiFig. 4. X-ray diffraction pattern of the YIG/BSTO/TiO_x/Si heterostructure

лизуется с характерными пиками. Среднеквадратичная шероховатость YIG пленки в оптимальных условиях роста составляет около 7 нм, что говорит о достаточной гладкости поверхности для практических применений.

На рентгенограмме полученной гетероструктуры видны основные рефлексы как ферромагнитного слоя YIG, так и сегнетоэлектрического слоя BSTO (см. рис. 4). Упорядоченный набор рефлексов YIG соответствует кубической решетке с параметром 1,2378 нм, что несколько больше, чем у соответствующего объемного монокристалла YIG (1,2376 нм). Расширение кристаллической решетки обусловлено влиянием неэпитаксиального механизма роста слоя феррит-граната на тонкой пленке BSTO. В этом случае решающую роль в

формировании структуры играет адгезия. Отсутствие рентгеновских рефлексов слоя TiO_x на дифрактограмме может свидетельствовать как о его аморфном состоянии, так и о небольшом количестве вещества. Исследование элементного состава структуры, выполненное методом энергодисперсионной спектроскопии (рис. 5), установило соответствие ее элементов основным компонентам YIG, TiO_x, BSTO и Si.

Основные полученные результаты заключаются в том, что на поверхности наноразмерных пленочных структур суммарной толщиной менее 0,7 мкм поверхностный слой измененного состава, содержащий примеси органического происхождения и азота, распространяется на глубину до 5 нм. Ниже этого слоя состав пленок является однород-

Рис. 5. Элементный состав гетероструктуры YIG/BSTO/TiO_x/SiFig. 5. Elemental composition of the YIG/BSTO/TiO_x/Si heterostructure

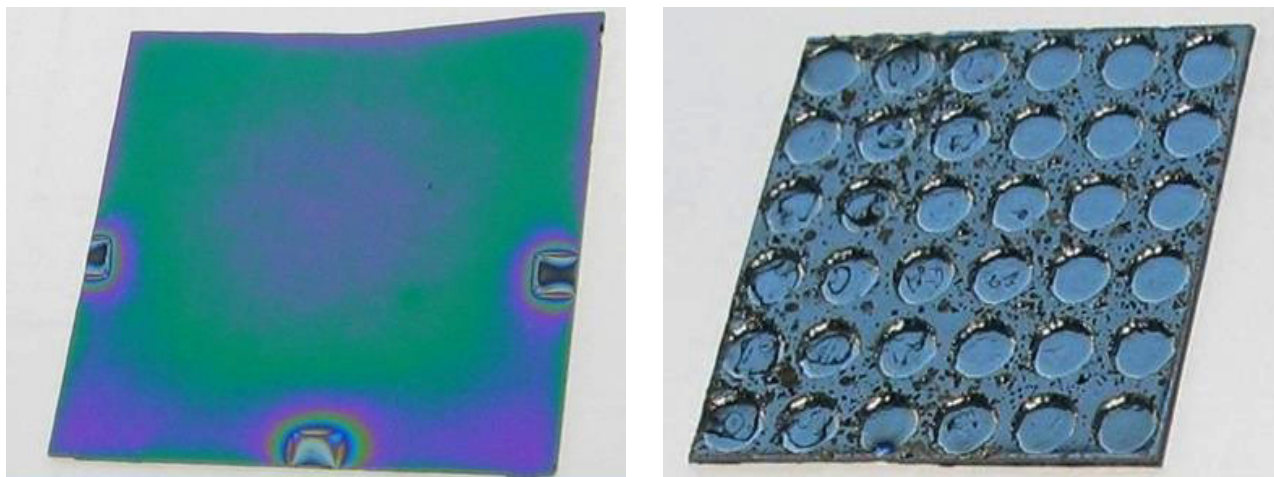

 Рис. 6. Внешний вид гетероструктуры YIG/BSTO/TiO₂/Si-мембрана

 Fig. 6. External appearance of the YIG/BSTO/TiO₂/Si membrane heterostructure

ным по глубине с точностью до 10 %. Суммарное содержание привнесенных примесей углерода, азота и примесей металлического происхождения (предположительно из-за подпыления оснастки) не превышает 4 %.

После отработки методики напыления пленок сегнетоэлектриков на кремниевых пластинах, они осаждались на кремниевые подложки в виде мембран. Внешний вид, полученной гетероструктуры, показан на рис. 6.

Заключение

Таким образом, комплексное применение методов ионно-лучевого осаждения-распыления позволило сформировать пленочные наноразмерные гетероструктуры YIG/BSTO/TiO₂/Si с плоскопараллельными границами и стабильными в комнатном интервале температур свойствами, предна-

значенными для применения в качестве функциональных слоев на кремниевых мембранах микроэлектромеханических чувствительных элементов микросистемной техники. Новых результатов из области синтеза пленок титаната бария—стронция, продемонстрировавших, что они могут обладать сегнетоэлектрическим характером упорядочения даже в наноразмерном диапазоне толщин, оказалось достаточно для экспериментального определения условий эпитаксиального сопряжения пленок со структурообразующей подложкой и для оптимизации условий формирования.

Полученные результаты и разработанные плазменные процессы являются перспективными для применения не только в микроэлектронике, но более всего — в микроэлектромеханике, особенно для получения сегнетоэлектрических мембран на кремнии, интегрированных в состав устройств микросистемной техники.

Библиографический список / References

1. Стогний А.И., Серов А.А., Корякин С.В., Паньков В.В. Газоразрядный источник ионов низкого давления с полым катодом и диаметром выходной апертуры 420 мм. *Приборы и техника эксперимента*. 2008; 2: 162—165.
2. Stognii A.I., Serov A.A., Koryakin S.V., Pan'kov V.V. A low-pressure gas-discharge ion source with a hollow cathode and an output-aperture diameter of 420 mm. *Instruments and Experimental Techniques*. 2008; 51(2): 311—314. (In Russ.). <https://doi.org/10.1007/s10786-008-2028-y>
3. Ponds J.M., Kirchoefer S.W., Chang W., Horwitz J.S., Chrisey D.B. Microwave properties of ferroelectric thin films. *Integrated Ferroelectrics*. 1998; 22: 317—323. <https://doi.org/10.1080/10584589808208052>
4. Baniecki J.D., Laibowitz R.B., Shaw T.W., Duncombe P.R., Neumayer D.A., Kotecki D.E., Shen H., Ma Q.Y. Dielectric relaxation of Ba_{0.7}Sr_{0.3}TiO₃ thin films from 1mHz to 20 GHz. *Applied Physics Letters*. 1998; 72: 498—500. <https://doi.org/10.1063/1.120796>
5. Kozyrev A.B., Ivanov A.V., Samoilova T.B., Soldatenkov O.I., Sengupta L.C., Rivkin T.V. Microwave properties of ferroelectric (Ba,Sr)TiO₃ varactors at high microwave power *Integrated Ferroelectrics*. 1999; 24: 297—307. <https://doi.org/10.1080/10584589908215599>
6. Eerenstein W., Mathur N.D., Scott J.F. Multiferroic and magnetoelectric materials. *Nature*. 2006; 442: 759—765. <https://doi.org/10.1038/nature05023>
7. Ma J., Hu J., Li Z., Nan C.W. Recent progress in multiferroic magnetoelectric composites: from bulk to thin films. *Advanced Materials*. 2011; 23: 1062—1087. <https://doi.org/10.1002/adma.201190024>
8. Özgür Ü., Alivov Y., Morkoç H. Microwave ferrites. Part 1: Fundamental properties. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2009; 20: 789—834. <https://doi.org/10.1007/s10854-009-9923-2>
9. Johnson K.M. Variation of dielectric constant with voltage in ferroelectrics and its application to parametric devices. *Journal of Applied Physics*. 1962; 33: 2826—2831. <https://doi.org/10.1063/1.1702558>

9. Kuylenstierna D., Vorobiev A., Linner P., Gevorgian S. Ultrawide-band tunable true-time delay lines using ferroelectric varactors. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2005; 53(6): 2164—2170. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2005.848805>

10. Suherman P.M., Jackson T.J., Tse Y.Y., Jones I.P., Chakalova R.I., Lancaster M.J., Porch A. Microwave properties of $\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{TiO}_3$ thin film coplanar phase shifters *Journal of Applied Physics*. 2006; 99(10): 104101. <https://doi.org/10.1063/1.2198933>

11. Balinskiy M., Ojha Sh., Chiang H., Ranjbar M., Ross C.A., Khitun A. Spin wave excitation in sub-micrometer thick $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ films fabricated by pulsed laser deposition on garnet and silicon substrates: A comparative study. *Journal of Applied Physics*. 2017; 122(12): 123904. <https://doi.org/10.1063/1.4990565>

12. Sokolov, N.S. Fedorov V.V., Korovin A.M., Suturin S.M., Baranov D.A., Gastev S.V., Krichevtsov B.B., Maksimova K.Yu., Grunin A.I., Bursian V.E., Lutsev L.V., Tabuchi M. Thin yttrium iron garnet films grown by pulsed laser deposition: Crystal structure, static, and dynamic magnetic properties. *Journal of Applied Physics*. 2016; 119(2): 023903. <https://doi.org/10.1063/1.4939678>

13. Serga A.A., Chumak A.V., Hillebrands B. YIG magnonics. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2010; 43(26): 264002. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/43/26/264002>

14. Pirro P., Bracher T., Chumak A.V., Lagel B., Dubs C., Surzhenko O., Gornert P., Leven B., Hillebrands B.

Spin-wave excitation and propagation in microstructured waveguides of yttrium iron garnet/Pt bilayers. *Applied Physics Letters*. 2014; 104(1): 012402. <https://doi.org/10.1063/1.4861343>

15. Das J., Song Y.-Y., Mo N., Krivosik P., Patton C.E. Electric-field-tunable low loss multiferroic ferromagnetic-ferroelectric heterostructures. *Advanced Materials*. 2009; 21(20): 2045—2049. <https://doi.org/10.1002/adma.200803376>

16. Özgür Ü., Alivov Y., Morkoç H. Microwave ferrites. Part 2: Passive components and electrical tuning. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2009; 20: 911—952. <https://doi.org/10.1007/s10854-009-9924-1>

17. Yang L., Ponchel F., Wang G., Rémiens D., Léger J.-F., Chateigner D., Dong X. Microwave properties of epitaxial (111)-oriented $\text{Ba}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{TiO}_3$ thin films on $\text{Al}_2\text{O}_3(0001)$ up to 40 GHz. *Applied Physics Letters*. 2010; 97(16): 162909. <https://doi.org/10.1063/1.3478015>

18. Ponchel F., Lei X., Rémiens D., Wang G., Dong X. Microwave evaluation of $\text{Pb}_{0.4}\text{Sr}_{0.6}\text{TiO}_3$ thin films prepared by magnetron sputtering on silicon: Performance comparison with $\text{Ba}_{0.3}\text{Sr}_{0.7}\text{TiO}_3$ thin films. *Applied Physics Letters*. 2011; 99(17): 172905. <https://doi.org/10.1063/1.3656065>

19. Guo X., Chen Yi., Wang G., Rémiens D., Ponchel Fr., Zhang W., Lian J., Dong X. Investigation of novel ferroelectric/gyromagnetic ferrite $(\text{Pb},\text{Sr})\text{TiO}_3/\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ layered thin films with potential applications in magnetically and electrically tuning devices. *Materials Letters*. 2017; 195: 182—185. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2017.02.126>

Информация об авторах / Information about the authors

Афанасьев Михаил Сергеевич — доктор техн. наук, ведущий научный сотрудник, лаборатория № 251, Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук (фрязинский филиал), пл. Введенского, д. 1, Фрязино, Московская обл., 141120, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5475-8616>; e-mail: gvc@ms.ire.rssi.ru

Гольдман Евгений Иосифович — канд. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник, лаборатория № 251, Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук (фрязинский филиал), пл. Введенского, д. 1, Фрязино, Московская обл., 141120, Российская Федерация; e-mail: gvc@ms.ire.rssi.ru

Стогний Александр Иванович — канд. физ.-мат. наук, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению, ул. П. Бровки, д. 19, Минск, 220072, Республика Беларусь

Чучева Галина Викторовна — доктор физ.-мат. наук, главный научный сотрудник, лаборатория № 251, Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук (фрязинский филиал), пл. Введенского, д. 1, Фрязино, Московская обл., 141120, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9956-1857>; e-mail: gvc@ms.ire.rssi.ru

Mikhail S. Afanasyev — Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Laboratory No. 251, Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences (Fryazino Branch), 1 Vvedenskogo Sq., Fryazino, Moscow Region 141120, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5475-8616>; e-mail: gvc@ms.ire.rssi.ru

Evgeniy I. Goldman — Cand. Sci. (Phys.-Math.), Leading Researcher, Laboratory No. 251, Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences (Fryazino Branch), 1 Vvedenskogo Sq., Fryazino, Moscow Region 141120, Russian Federation; e-mail: gvc@ms.ire.rssi.ru

Alexander I. Stogniy — Cand. Sci. (Phys.-Math.), Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Materials Science, 19 Petrusya Brovki Str., Minsk 220072, Republic of Belarus

Galina V. Chucheva — Dr. Sci. (Phys.-Math.), Chief Researcher, Laboratory No. 251, Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences (Fryazino Branch), 1 Vvedenskogo Sq., Fryazino, Moscow Region 141120, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9956-1857>; e-mail: gvc@ms.ire.rssi.ru

Поступила в редакцию 09.10.2023; поступила после доработки 10.11.2023; принята к публикации 17.11.2023
Received 09 October 2023; Revised 10 November 2023; Accepted 17 November 2023

* * *