Широков В.Б., Тимошенко П.Е., Калинчук В.В. Генерация ПАВ сегнетоэлектрической пленкой BST при действии одноосной нагрузки // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2023. – № 1. С. 173–178. DOI: 10.15593/perm.mech/2023.1.16

Shirokov V.B., Timoshenko P.E., Kalinchuk V.V. Generation of SAW in BST ferroelectric film under uniaxial strain. *PNRPU Mechanics Bulletin,* 2023, no. 1, pp. 173-178. DOI: 10.15593/perm.mech/2023.1.16

пермский политех

ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА
№ 1, 2023
PNRPU MECHANICS BULLETIN
https://ered.pstu.ru/index.php/mechanics/index



Научная статья

DOI: 10.15593/perm.mech/2023.1.16
УДК 539.3

ГЕНЕРАЦИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЛЕНКОЙ BST ПРИ ДЕЙСТВИИ ОДНООСНОЙ НАГРУЗКИ

В.Б. Широков[1,2], П.Е. Тимошенко[2], В.В. Калинчук[1]

[1] Южный научный центр РАН, Ростов-на-Дону, Россия
[2] Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 25 ноября 2022 г.
Одобрена: 13 марта 2023 г.
Принята к публикации:
05 апреля 2023 г.

Ключевые слова:

сегнетоэлектрики, титанат бария стронция, феноменологическая теория, метод конечных элементов, поверхностные акустические волны.

АННОТАЦИЯ

Электромеханические свойства сегнетоэлектрической пленки титаната бария стронция (BST) на подложке кремния зависят от приложенной деформации. Особенно сильная зависимость наблюдается для концентраций, близких к значениям, при которых происходит смена фазовых состояний сегнетоэлектрической пленки. В рамках термодинамической теории фазовых переходов исследована модель монокристаллической пленки BST вблизи такой области под действием одноосной растягивающей нагрузки. Полученные в модели материальные постоянные пленки использованы для численных расчетов возбуждения рэлеевских акустических волн на поверхности гетероструктуры пленка-подложка. Показано, что при изменении деформации происходит смещение экстремумов *S*-параметров, характеризующих эффективность возбуждения поверхностных волн. Приведено изменение *S*-параметров для первых трех резонансов, определяемых геометрией встречно-штыревых электродов. Наибольшее смещение резонансных частот наблюдается для второго резонанса – волны Сезава.

© ПНИПУ

© **Широков Владимир Борисович** – д.ф.-м.н., в.н.с., e-mail: shirokov-vb@rambler.ru.
Тимошенко Павел Евгеньевич – к.ф.-м.н., доц., e-mail: p.e.timoshenko@gmail.com.
Калинчук Валерий Владимирович – д.ф.-м.н., член-корр. РАН, e-mail: kalin@ssc-ras.ru.

Vladimir B. Shirokov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher, e-mail: shirokov-vb@rambler.ru.
Pavel E. Timoshenko – CSc of Physics and Mathematics, Associate Professor, e-mail: p.e.timoshenko@ gmail.com.
Valery V. Kalinchuk – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, e-mail: kalin@ssc-ras.ru.

Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

GENERATION OF SAW IN BST FERROELECTRIC FILM UNDER UNIAXIAL STRAIN

V.B. Shirokov[1,2], P.E. Timoshenko[2], V.V. Kalinchuk[1]

[1]Southern Scientific Center of RAS, Rostov-on-Don, Russian Federation
[2]Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 25 November 2022
Approved: 13 March 2023
Accepted for publication:
05 April 2023

Keywords:

Ferroelectrics, Barium Strontium Titanate, Phenomenological Theory, Finite-Element Method, Surface Acoustic Waves.

ABSTRACT

The electro-mechanical properties of a ferroelectric film of barium strontium titanate (BST) film located on a silicon substrate depend on applied external strain. A significant dependence is observed for concentrations close to values, where a phase transition for the ferroelectric film occurs. A model of single-crystal BST film near the phase transition under uniaxial strain is studied by the thermodynamic theory of phase transitions. The material properties of the film obtained by the model are used for numerical study of the excitation of Rayleigh' acoustic waves on the surface of the film-substrate heterostructure. Shifting the extrema of S-parameters, characterizing the efficiency of excitation of surface acoustic waves, is shown under the applied strain. The change of S-parameters for the first three resonances determined principally by the geometry of the interdigital electrodes is presented. The largest shift of resonant frequency is observed in a case of the second resonance that corresponds to Sezava wave.

© PNRPU

Введение

Уникальные нелинейные свойства сегнетоэлектрических материалов находят широкое применение в изготовлении различных промышленно важных устройствах [1; 2]. Уменьшение размеров и энергопотребления элементов микроэлектроники приводит к тому, что сегнетоэлектрические материалы все больше и больше применяются в тонкопленочном исполнении [3–6]. Нанесение пленки нелинейного материала на подложку приводит к изменению физических свойств пленки из-за разных величин термоупругих деформаций пленки и подложки. Это приводит к возможности управления свойствами пленки, меняя температуру нанесения тонкой пленки, подбирая материал подложки или ее ориентацию. Такое направление – деформационная инженерия, или straintronics [7–10], быстро развивается, благодаря потребности микроэлектроники в материалах, обладающих необходимыми свойствами.

Для того, чтобы управлять функциональными свойствами тонких пленок таким способом требуется детальное понимание связи между физическими свойствами пленки и ее деформацией. Такая связь может быть получена из построения термодинамических моделей для сегнетоэлектрических пленок и анализа фазовых диаграмм, полученных в рамках этих моделей. Деформационное управление свойствами возможно не только через синтез пленки (температура – подложка). Механическое воздействие на подложку будет приводить к появлению деформаций, дополнительных к вынужденным деформациям в пленке. Зная фазовую диаграмму, можно найти такую величину воздействия, которое приведет к существенным изменениям физических свойств, или даже к смене фазового состояния сегнетоэлектрической пленки.

Твердые растворы бария-стронция-титана (BST) благодаря своим уникальным свойствам широко используются в различных областях микроэлектроники. Термодинамическая теория, разработанная для всего ряда этих твердых растворов [11], позволяет определить термодинамические потенциалы для пленок необходимого стехиометрического состава и построить для пленок этих составов фазовые диаграммы [12]. Линеаризация модельных уравнений состояния позволяет определить материальные постоянные для линейных уравнений пьезоэффекта, без которых невозможна разработка практических устройств. Зависимость материальных постоянных от величины вынужденной деформации и фазового состояния пленки [13–16] позволяет сделать выбор материала активной пленки и охарактеризовать условия использования.

В данной работе на основе термодинамической модели для пленки BST выделенной концентрации, нанесенной на кубическую подложку (001) среза монокристаллического кремния и испытывающей одноосную деформацию, исследованы условия для эффективной генерации поверхностных акустических волн (ПАВ). С помощью пакета конечно-элементного моделирования COMSOL Multiphysics исследована возможность управления поверхностной акустической волной, возбуждаемой пленкой на ограниченной кремниевой подложке, при помощи одноосной деформации.

1. Выбор пленки и ориентации для генерации ПАВ

Сегнетоэлектрическая пленка, нанесенная на кубическую подложка (001) среза испытывает деформацию (u_m, misfit strain), которая в силу симметрии одинакова вдоль x и y направлений. Эта деформация определяется

начальной деформацией, формирующейся в момент осаждения пленки при высокой температуре, а также при охлаждении благодаря различию коэффициентов теплового расширения пленки и подложки. Пусть подложка дополнительно испытывает деформацию $u_1=u_x$ вдоль оси x. Тогда из решения упругой задачи при условии, что на нее не действуют никакие другие силы, получим для деформации в плоскости подложки следующую связь $u_2=u_y=-\sigma u_x$, где σ – коэффициент Пуассона, равный $\sigma=-s_{12}/s_{11}=c_{12}/(c_{11}+c_{12})$ для (001) ориентации подложки. Здесь c_{ij} – упругие модули, а s_{ij} – податливости подложки. Деформации подложки определены на параметре решетки подложки. Так как смещения на границе пленки и подложки должны быть одинаковы, то деформации пленки будут пропорциональны деформации подложки с коэффициентом, равным отношению параметров решетки пленки к подложке. Учитывая симметрию, вышеописанная связь между деформациями u_x и u_y будет верна и для пленки.

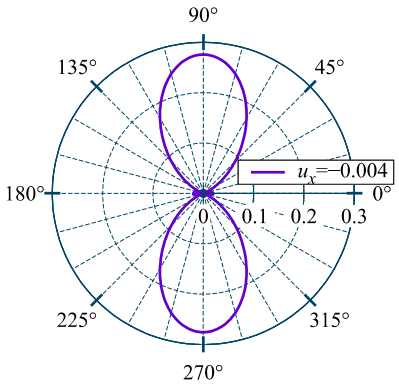


Рис. 1. Зависимость коэффициента электромеханической связи рэлеевской волны гетероструктуры BST пленка – кремниевая подложка от угла между направлением распространения ПАВ и осью x. Пленка толщиной 300 нм в bc-фазе при u_x=–0,004

Fig. 1. The dependence of electromechanical coupling coefficient of the Rayleigh wave for the BST film-silicon substrate heterostructure on the angle between the SAW propagation direction and the x-axis. The film is 300 nm thickness in the bc-phase at u_x=–0.004

Концентрацию состава пленки выберем из условия схождения всех фаз на фазовой диаграмме в плоскости (u_m, u_x) [17], что соответствует концентрации бария 86,3 %. В дальнейшем рассмотрим возбуждение ПАВ при u_m=0, в отличие от [17], в bc-фазе, в которой поляризация направлена под наклоном к плоскости пленки в направлении y-оси, ортогонально к действующей u_x деформации. Согласно фазовой диаграмме [17], такое фазовое состояние пленки возможно при сжимающих одноосных деформациях, u_x<0. Материальные постоянные будем использовать, вычисленные на основе термодинамической модели, представленной в [17].

Рассмотрим поведение величины электромеханической связи k рэлеевской волны при распространении ее по поверхности гетероструктуры пленка – кремниевая подложка в зависимости от направления распространения ПАВ. Коэффициент электромеханической связи будем вычислять по формуле:

$$k=\sqrt{2\frac{\Delta f}{f}}, \qquad (1)$$

где Δf – разность частот при распространении поверхностной волны одной и той же длины волны по свободной и металлизированной поверхности сегнетоэлектрика.

Результаты вычислений, выполненных с помощью программного пакета COMSOL Multiphysics, показаны на рис. 1. В работе использована пленка BST86.3 толщиной 300 нм при u_x = –0,004 на поверхности монокристаллического кремния (001) среза. Как видно из рис. 1, наиболее эффективное возбуждение ПАВ будет происходить в направлении y-оси, перпендикулярно действующей деформации. Именно в этом направлении представлено исследование эффективности генерации ПАВ.

2. Генерация ПАВ в *bc*-фазе

Анализ эффективности генерации ПАВ при изменении деформации вдоль оси x проведем в пакете конечно-элементного моделирования COMSOL Multiphysics. Геометрия 2D-модели приведена на рис. 2. Модель представляет собой пленку BST толщиной h_f= 300 нм, расположенную на периодической вдоль оси x монокристаллической подложке кремния толщиной h_s = 15 мкм. Оси четвертого порядка подложки направлены вдоль координатных осей x и y. На пленке расположены электроды толщиной h_e = 200 нм и шириной w_e = 2 мкм. Ширина межэлектродного промежутка w_g = 2 мкм. Представленная гетероструктура имеет период вдоль оси ординат, равный $4(w_e+w_g)$ = 16 мкм.

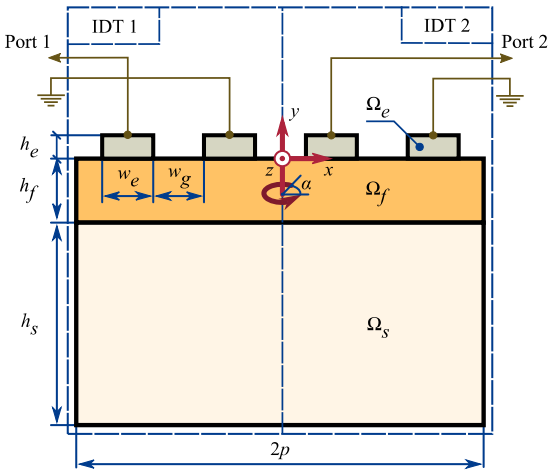


Рис. 2. 2D-геометрия модели в COMSOL Multiphysics: w_e = w_g = 2 мкм, h_e = 0,2 мкм, h_f = 300 нм, h_s = 15 мкм

Fig. 2. Two-dimensional geometry of BST/Si layered two-port finite-element model of bandpass SAW filter with w_e = w_g = 2 μm, h_e = 0.2 μm, h_f = 300 nm, h_s = 15 μm

Чтобы вычислить параметры матрицы рассеяния (*S*-параметры), как показано на рис. 2, введены две системы электродов встречно-штыревых преобразователей (IDT) – возбуждающие (IDT1) и приемные (IDT2). Рассмотрим три первые ПАВ-волны, которые можно возбудить в такой структуре. Распределение смещений в этих волнах представлено на рис. 3.

На рис. 4 приведены частотные характеристики *S*-параметров, характеризующих отражение и прохождение ПАВ в полосе частот вблизи 286 МГц (в области 286–290 МГц), соответствующей первому резонансу ПАВ. Как видно из рисунков, при изменении одноосного растяжения в *bc*-фазе частота резонанса меняется в пределах 2 МГц.

На рис. 5 приведены частотные характеристики *S*-параметров, описывающие резонансные свойства ПАВ полосового фильтра на частоте вблизи 528 МГц (в области 528–546 МГц). Из рисунков видно, что при одноосном растяжении частота резонанса меняется в пределах 9 МГц.

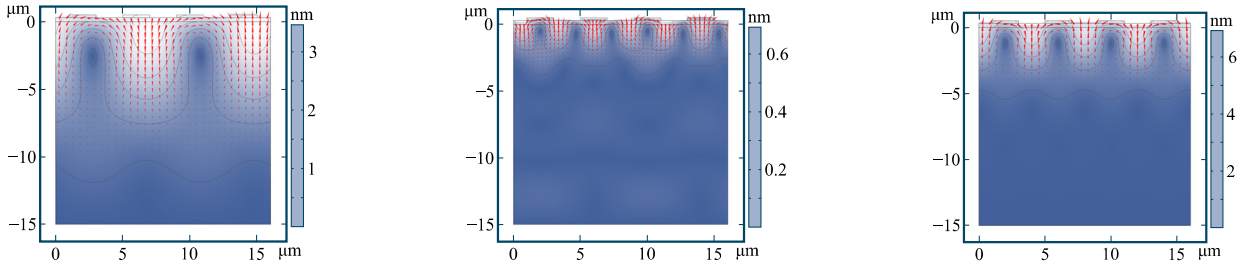


Рис. 3. Распределение смещений в ПАВ волнах: *a* – 286 МГц; *b* – 528 МГц; *c* – 770 МГц

Fig. 3. Distribution of displacement for the SAW resonant frequencies: *a* – 286 MHz; *b* – 528 MHz; *c* – 770 MHz

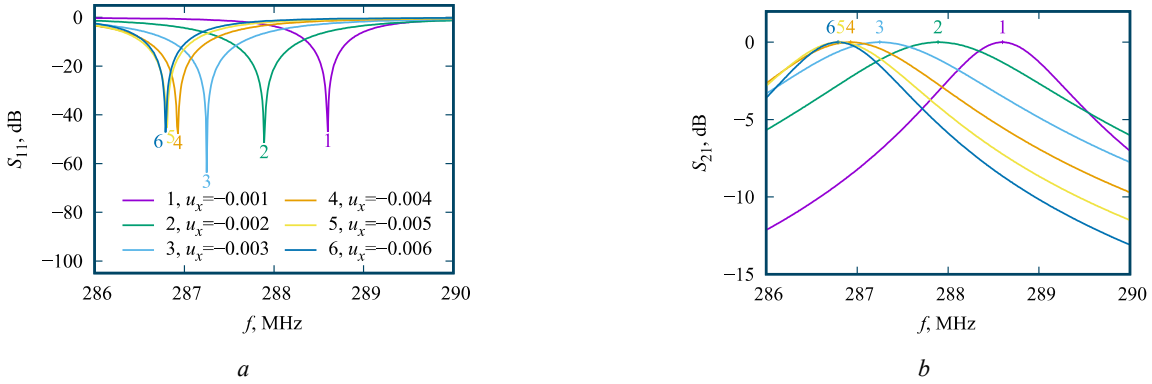


Рис. 4. Частотные зависимости параметров S_{11} (*a*) и S_{21} (*b*) для ПАВ-волны вблизи 286 МГц при изменении величины одноосной деформации u_x в bc-фазе

Fig. 4. The frequency dependence of scattering parameters S_{11} (*a*) and S_{21} (*b*) for of the resonance (Rayleigh's wave) near 286 MHz under various uniaxial stresses u_x at *bc*-phase

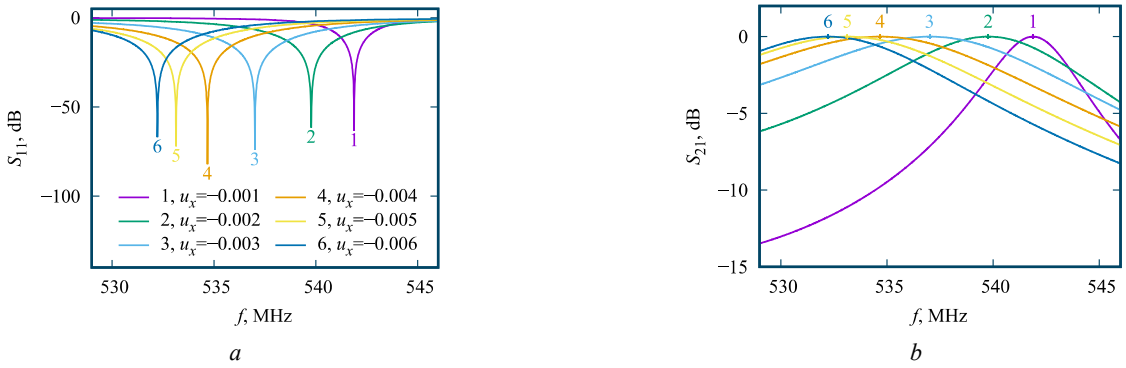
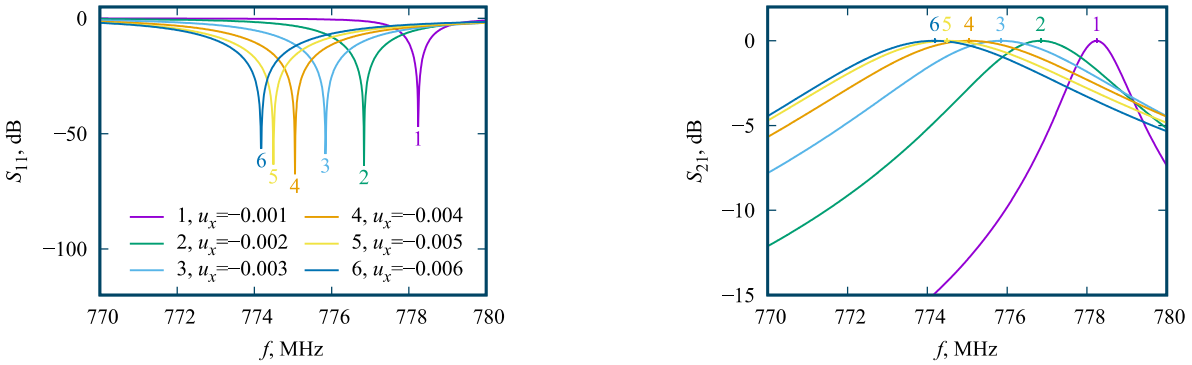


Рис. 5. Частотные зависимости параметров S_{11} (*a*) и S_{21} (*b*) для ПАВ-волны вблизи 528 МГц при изменении величины одноосной деформации u_x в *bc*-фазе

Fig. 5. The frequency dependence of scattering parameters S_{11} (*a*) and S_{21} (*b*) for of the resonance (Rayleigh's wave) near 528 MHz under various uniaxial stresses u_x at *bc*-phase



a *b*

Рис. 6. Частотные зависимости параметров S_{11} (*a*) и S_{21} (*b*) для ПАВ-волны вблизи 770 МГц при изменении величины одноосной деформации u_x в *bc*-фазе

Fig. 6. The frequency dependence of scattering parameters S_{11} (*a*) and S_{21} (*b*) for of the resonance (Rayleigh's wave) near 770 MHz under various uniaxial stresses u_x at *bc*-phase

S-параметры, характеризующие резонансные свойства ПАВ полосового фильтра на частоте вблизи 770 МГц (в области 770–780 МГц), приведены на рис. 6. Из рисунков видно, что при одноосном растяжении частота резонанса меняется в пределах 4 МГц.

Заключение

Исследована генерация поверхностных акустических волн на поверхности гетероструктуры сегнетоэлектрическая пленка BST86.3 – кремниевая подложка при конечно-элементном моделировании в COMSOL Multiphysics. ПАВ возбуждались в области трех частот 286; 528 и 770 МГц. В области частот первого ПАВ резонанса, 286 МГц, изменение частоты при одноосном сжатии происходит в пределах 2 МГц. На втором резонансе, в области 528 МГц, изменение частоты при деформации происходит более значительно, порядка 10 МГц. На третьем резонансе, 770 МГц, изменение частоты порядка 4 МГц. Таким образом, наиболее чувствительной к одноосной деформации является второй ПАВ резонанс – 528 МГц.

Полученные результаты могут лежать в основе разработки деформационных МЕМС устройств. При статических деформациях это могут быть ПАВ датчики, следящие за изменением частоты. При динамических изменениях это могут быть датчики, контролирующие через изменение частоты амплитуду или скорость колебаний балки, на поверхности которой расположен ПАВ резонатор.

Библиографический список

1. Ferroelectric materials for microwave tunable applications / A.K. Tagantsev, V.O. Sherman, K.F. Astafiev, J. Venkatesh, N. Setter // Journal of Electroceramics. – 2003. – Vol. 11. – P. 5–66. DOI: 10.1023/B:JECR.0000015661.81386.e6

2. Gevorgian S. Ferroelectrics in microwave devices, circuits and systems. Physics, Modelling, fabrication and measurements. – London: Springer-Verlag, 2009. – 396 p. DOI: 10.1007/978-1-84882-507-9

3. Dawber M., Rabe K.M., Scott J.F. Physics of thin-film ferroelectric oxides // Rev. Mod. Phys. – 2005. – Vol. 77. – P. 1083–1130. DOI: 10.1103/RevModPhys.77.1083

4. Ferroelectric thin films: Review of materials, properties, and applications / N. Setter, D. Damjanovic, L. Eng, G. Fox [et al.] // Journal of Applied Physics. – 2006. – Vol. 100. – P. 051606(47). DOI: 10.1063/1.2336999

5. Martin L.W., Chu Y.-H., Ramesh R. Advances in the growth and characterization of magnetic, ferroelectric, and multiferroic oxide thin films // Materials Science and Engineering R. – 2010. – Vol. 68. – P. 89–133. DOI: 10.1016/j.mser.2010.03.001

6. Ahmed A., Goldthorpe I.A., Khandani A.K. Electrically tunable materials for microwave applications // Applied Physics Reviews. – 2015. – Vol. 2. – P. 011302(17). DOI: 10.1063/1.4906255

7. Strain tuning of ferroelectric thin films / D.G. Schlom, L.-Q. Chen, C.-B. Eom, K.M. Rabe [et al.] // Annu. Rev. Mater. Res. – 2007. – Vol. 37. – P. 589–626. DOI: 10.1146/annurev.matsci.37.061206.113016

8. Cao J., Wu J. Strain effects in low-dimensional transition metal oxides // Materials Science and Engineering R. – 2011. – Vol. 71. – P. 35–52. DOI: 10.1016/j.mser.2010.08.001

9. Elastic strain engineering of ferroic oxides / D.G. Schlom, L.-Q. Chen, C.J. Fennie, V. Gopalan [et al.] // MRS Bulletin. – 2014. – Vol. 39. – P. 118–130. DOI: 10.1557/mrs.2014.1

10. New modalities of strain-control of ferroelectric thin films / A.R. Damodaran, J.C. Agar, S. Pandya, Z. Chen [et al.] // J. Phys.: Condens. Matter. – 2016. – Vol. 28. – P. 263001(36). DOI: 10.1088/0953-8984/28/26/263001

11. Concentration phase diagram of $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ solid solutions / V.B. Shirokov, V.I. Torgashev, A.A. Bakirov, V.V. Lemanov // Phys. Rev. B. – 2006. – Vol. 73. – P. 104116(7). DOI: 10.1103/PhysRevB.73.104116

12. Phenomenological theory of phase transitions in epitaxial $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ thin films / V.B. Shirokov, Yu.I. Yuzyuk, B. Dkhil, V.V. Lemanov // Phys. Rev. B. – 2009. – Vol. 79. – P. 144118(9). DOI: 10.1103/PhysRevB.79.144118

13. Anomalies of piezoelectric coefficients in barium titanate thin films / Shirokov V., V. Kalinchuk, R. Shakhovoy, Yu. Yuzyuk // EPL. – 2014. – Vol. 108. – P. 47008(5). DOI: 10.1209/0295-5075/108/47008.

14. Материальные константы твердых растворов $(Ba,Sr)TiO_3$ / В.Б. Широков, Ю.И. Юзюк, В.В. Калинчук, В.В. Леманов // ФТТ. – 2013. – Т. 55, № 4. – С. 709–714. – URL: https://journals.ioffe.ru/articles/998

15. К проблеме определения упругих постоянных тонких сегнетоэлектрических пленок / В.Б. Широков, В.В. Калинчук, Р.А. Шаховой, Ю.И. Юзюк // Доклады академии наук, физика. – 2015. – Т. 463, № 6. – С. 655–660.

16. Материальные константы тонких пленок титаната бария / В.Б. Широков, В.В. Калинчук, Р.А. Шаховой, Ю.И. Юзюк // ФТТ. – 2015. – Т. 57, № 8. – С. 1509–1514. – URL: https://journals.ioffe.ru/articles/42109

17. Широков В.Б., Тимошенко П.Е., Калинчук В.В. Управление свойствами сегнетоэлектрической пленки $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ // Прикладная механика и техническая физика. – 2021. – № 5. – С. 80–88. DOI: 10.15372/PMTF20210508

References

1. Tagantsev A.K., Sherman V.O., Astafiev K.F., Venkatesh J., Setter N. Ferroelectric materials for microwave tunable applications. *Journal of Electroceramics,* 2003, Vol. 11, pp. 5-66. doi: 10.1023/B:JECR.0000015661.81386.e6

2. Gevorgian S. Ferroelectrics in microwave devices, circuits and systems. Physics, Modelling, fabrication and measurements. London: Springer-Verlag, 2009, 396 p. doi: 10.1007/978-1-84882-507-9

3. Dawber M., Rabe K.M., Scott J.F., Physics of thin-film ferroelectric oxides. *Rev. Mod. Phys,* 2005, Vol. 77, p. 1083-1130. doi: 10.1103/RevModPhys.77.1083

4. Setter N., Damjanovic D., Eng L., Fox G., and et al. Ferroelectric thin films: Review of materials, properties, and applications. *Journal of Applied Physics,* 2006, Vol. 100, p. 051606(47). doi: 10.1063/1.2336999

5. Martin L.W., Chu Y.-H., Ramesh R. Advances in the growth and characterization of magnetic, ferroelectric, and multiferroic oxide thin films. *Materials Science and Engineering R*, 2010, Vol. 68, pp. 89-133. doi: 10.1016/j.mser.2010.03.001

6. Ahmed A., Goldthorpe I.A., Khandani A.K. Electrically tunable materials for microwave applications. *Applied Physics Reviews*, 2015, Vol. 2, pp. 011302(17). doi: 10.1063/1.4906255

7. Schlom D.G., Chen L.-Q., Eom C.-B., Rabe K.M., and et al. Strain tuning of ferroelectric thin films. *Annu. Rev. Mater. Res*, 2007, Vol. 37, pp. 589-626. doi: 10.1146/annurev.matsci.37.061206.113016

8. Cao J., Wu J. Strain effects in low-dimensional transition metal oxides. *Materials Science and Engineering R*, 2011, Vol. 71, pp. 35-52. doi: 10.1016/j.mser.2010.08.001

9. Schlom D.G., Chen L.-Q., Fennie C.J., Gopalan V, and et al. Elastic strain engineering of ferroic oxides. *MRS Bulletin*, 2014, Vol. 39, pp. 118-130. doi: 10.1557/mrs.2014.1

10. Damodaran A.R., Agar J.C., Pandya S., Chen Z., and et al. New modalities of strain-control of ferroelectric thin films. *J. Phys.: Condens. Matter*, 2016, Vol. 28, pp. 263001(36) doi: 10.1088/0953-8984/28/26/263001

11. Shirokov V.B., Torgashev V.I., Bakirov A.A., Lemanov V.V. Concentration phase diagram of $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ solid solutions. *Phys. Rev. B*, 2006, Vol. 73, pp. 104116(7) doi: 10.1103/PhysRevB.73.104116

12. Shirokov V.B., Yuzyuk Yu.I., Dkhil B., Lemanov V.V. Phenomenological theory of phase transitions in epitaxial $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ thin films. *Phys. Rev. B*, 2009, Vol. 79, pp. 144118(9) doi: 10.1103/PhysRevB.79.144118

13. Shirokov V., Kalinchuk V., Shakhovoy R., Yuzyuk Yu. Anomalies of piezoelectric coefficients in barium titanate thin films. *EPL*, 2014, Vol. 108, pp. 47008(5) doi: 10.1209/0295-5075/108/47008.

14. Shirokov V.B., Yuzyuk Yu.I., Kalinchuk V.V., Lemanov V.V. Material constants of $(Ba,Sr)TiO_3$ solid solutions. *Physics of the solid state*, 2013, Vol. 55, No. 4, pp. 773–779. doi: 10.1134/S1063783413040276

15. Shirokov V.B., Kalinchuk V.V., Shakhovoi R.A., Yuzyuk Yu.I. The problem of determining elastic constants of thin ferroelectric films. *Doklady physics*, 2015, Vol. 60, No. 8, pp. 349–354. doi: 10.1134/S1028335815080108.

16. Shirokov V.B., Kalinchuk V.V., Shakhovoi R.A., Yuzyuk Yu.I. Material constants of barium titanate thin films. Physics of the solid state, 2015, Vol. 57, No. 8, pp. 1535–1540. doi: 10.1134/S1063783413040276.

Shirokov V.B., Timoshenko P.E., Kalinchuk V.V. Controlling the Properties of a $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ ferrelectric film. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2021, No. 5, pp. 80–88, doi: 10.1134/S0021894421050084

Финансирование. Работа выполнена в рамках реализации госзадания ЮНЦ РАН, проект № 122020100343–4.
Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Вклад авторов равноценен.

Financing. The work was carried out within the framework of the implementation of the state task of the SSC RAS, project No. 122020100343–4.
Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.
The contribution of the authors is equivalent.