

УДК 537.9
DOI: 10.23885/2500-0640-2017-13-2-21-28

ДИНАМИКА РЕШЕТКИ В ПЛЕНКАХ НИОБАТА БАРИЯ – СТРОНЦИЯ ПРИ $T = 300\text{--}700\text{ К}$

© 2017 г. А.С. Анохин¹, Н.В. Лянгузов^{1,2}, А.В. Павленко^{1,2}

Аннотация. Методом газоразрядного RF-напыления в атмосфере чистого кислорода осуществлено напыление пленки твердого раствора сегнетоэлектрика-релаксора $\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Nb}_2\text{O}_6$ (BSN-50) на предварительно подготовленную подложку (111)Pt/(001)Si. Пленке BSN-50 свойственна аксиальная текстура, основные элементы (Ba, Sr, Nb) по ее толщине распределены равномерно, а количественный анализ характеристического рентгеновского спектра показал, что соотношение катионного состава соответствует составу BSN-50. При исследовании температурных зависимостей относительной диэлектрической проницаемости (ϵ'/ϵ_0) и остаточной поляризации (P_R) гетероструктуры Al/BSN-50/Pt/Si установлено, что фазовый переход из сегнетоэлектрической в параэлектрическую фазу достаточно сильно размыт (ширина максимума $\epsilon'/\epsilon_0(T_m)$ на полувысоте $\Delta T = 263\text{ К}$) и происходит при температуре $\sim 427\text{ К}$, намного превышающей температуру максимума диэлектрической проницаемости $T_m = 334\text{ К}$. В диапазоне температур $300\text{--}700\text{ К}$ методом спектроскопии комбинационного рассеяния света изучена динамика решетки пленки BSN-50. Наибольший вклад в интенсивность спектра пленки BSN вносят три широкие полосы в районе 230 см^{-1} , 630 см^{-1} и 850 см^{-1} , каждая из которых состоит из набора линий (всего 13 мод). Температурная зависимость частоты и полуширины полосы 630 см^{-1} в спектре комбинационного рассеяния пленки BSN показывают четкую аномалию при сегнетоэлектрическом фазовом переходе.

Ключевые слова: пленки, ниобат бария – стронция, спектроскопия КРС, диэлектрическая проницаемость.

LATTICE DYNAMIC OF BARIUM-STRONTIUM NIOBATE THIN FILMS IN THE TEMPERATURE RANGE 300–700 K

A.S. Anokhin¹, N.V. Lyanguzov^{1,2}, A.V. Pavlenko^{1,2}

Abstract. We manufactured a thin film of the relaxor ferroelectric solid solution $\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Nb}_2\text{O}_6$ (BSN-50) on the preliminary prepared (111)Pt/(001)Si substrate via the RF-sputtering technique in oxygen atmosphere. The BSN-50 film demonstrates an axial texture with uniform distribution of the cations (Ba, Sr, Nb) over its thickness. The quantitative analysis of the characteristic X-rays spectrum takes a good agreement of the cationic composition to $\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Nb}_2\text{O}_6$ compound. From studying the temperature dependences of the relative permittivity (ϵ'/ϵ_0) and the residual polarization (P_R) of the Al/BSN-50/Pt/Si heterostructure it is observed that the phase transition from the ferroelectric phase to the paraelectric phase is rather strongly blurred ($\epsilon'/\epsilon_0(T_m)$ FWHM = 263 K), and occurs at the temperature of about 427 K, much higher than the temperature of the maximum permittivity $T_m = 334\text{ K}$. The lattice dynamic of the BSN-50 film in the temperature range 300... 700 K was studied by Raman spectroscopy. It is shown that the greatest contribution to the intensity of the spectrum give three broad bands near 230 cm^{-1} , 630 cm^{-1} and 850 cm^{-1} , each of them consisting of a set of lines (a total of 13 modes). The temperature dependence of the frequency and half-width of the band at 630 cm^{-1} in the Raman spectrum of the BSN-50 film clearly illustrates an anomaly in the ferroelectric phase transition.

Keywords: films, barium-strontium niobat, Raman spectroscopy, permittivity.

¹ Южный научный центр Российской академии наук (Southern Scientific Centre, Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russian Federation), Российская Федерация, 344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41, e-mail: anokhin.andrey@gmail.com

² Южный федеральный университет (Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation), Российская Федерация, 344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, 105/42

ВВЕДЕНИЕ

Гетероструктуры на основе тонких пленок сегнетоэлектриков благодаря их многофункциональности находят все более широкое применение в таких областях современной техники, как микро- и наноэлектроника, микроэлектромеханические системы, СВЧ-техника и пр. [1; 2]. К числу наиболее перспективных сегнетоэлектрических материалов относятся твердые растворы $Ba_{1-x}Sr_xNb_2O_6$ (BSN), являющиеся типичными представителями класса сегнетоэлектриков-релаксоров. Ниобаты бария – стронция в интервале концентраций $x = 0,25... 0,75$ являются однофазными и принадлежат к структуре незаполненных тетрагональных вольфрамовых бронз (ТВБ) [3], в которой заполнены 5/6 катионных позиций. Основой данной структуры является трехмерный каркас $[Nb_2O_6]^{2-}$, сформированный сочлененными вершинами октаэдров NbO_6 и образующий три типа структурных каналов вдоль полярной оси: треугольные, четырехугольные и пятиугольные [3]. Общая структурная формула для вольфрамовых бронз (с 5 формульными единицами) $(A)_2(B)_4(C)_4Nb_{10}O_{30}$ допускает заполнение всех трех типов каналов атомами металлов. В структуре BSN позиции С (внутри наиболее узких каналов – треугольного сечения) не заполнены, позиции А (внутри четырехугольных каналов) частично заполнены атомами Sr, а позиции В (внутри пятиугольных каналов) статистически заполнены атомами Ba и Sr. Это, с одной стороны, позволяет вариацией состава (соотношение Ba и Sr, введение легирующих добавок [4] и пр.) в широких пределах изменять пьезоэлектрические и оптические параметры, температуру фазового перехода и релаксорные характеристики (степень размытия фазового перехода, дисперсионные параметры и пр.) твердых растворов BSN, а с другой стороны приводит к существованию в них объемных флуктуаций состава, появлению различного рода несоизмерных фаз, достаточно сложной динамики решетки и невозможности обнаружения, как и в случае ряда других релаксоров ($PbMg_{1/3}Nb_{2/3}O_3$, твердый раствор $PbMg_{1/3}Nb_{2/3}O_3 - PbTiO_3$), классических мягких мод [5]. Как показал анализ литературы, исследование температурной эволюции колебательного спектра и динамика решетки ниобатов бария – стронция методами спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС), позволяющими изучать микроскопические механизмы изменений структуры при

фазовых переходах в гетероструктурах [6; 7] без какого-либо воздействия на них, проводили преимущественно на монокристаллических [5; 8–11] и поликристаллических [12; 13] образцах.

В настоящей работе представлены результаты исследования методами КРС температурной эволюции колебательного спектра пленок $(Ba_{0,5}Sr_{0,5})Nb_2O_6$ (BSN-50) в диапазоне температур, охватывающем область размытого сегнетоэлектрического фазового перехода.

МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ

Газоразрядное RF-напыление BSN-пленок на подложку Pt(001)Si осуществляли в одну стадию в атмосфере чистого кислорода (температура подложки в ходе напыления 823–873 К, давление в камере 0,5 Т, ВЧ мощность 190 Вт) согласно методике, описанной в работе [14]. Для распыления использовали керамическую мишень стехиометрического состава $(Ba_{0,5}Sr_{0,5})Nb_2O_6$, изготовленную в отделе интеллектуальных материалов и нанотехнологий НИИ физики Южного федерального университета.

Для получения спектров КРС использовали поляризованное излучение аргонового лазера ($\lambda = 514,5$ nm) и микро-КРС-спектрометр Renishaw inVia Reflex с edge-фильтром, позволяющим записывать спектры начиная с 50 cm^{-1} . Спектры регистрировали по схеме обратного рассеяния с помощью оптического микроскопа Leica, диаметр лазерного пучка на образце составлял 1–2 μm . Для проведения температурных измерений в процессе нагрева использовали печь Linkam TS1500 (температура стабильность ~ 1 °С, шаг 10 К, выдержка 5 мин). Полученные спектры КРС были скорректированы на температурный фактор Бозе – Эйнштейна.

Исследования морфологии поверхности гетероструктуры Al/BSN/Pt/Si и профилей распределения химических элементов по ее толщине осуществляли на сканирующем электронном микроскопе FE-SEM Zeiss SUPRA 25, оснащенного приставкой для энергодисперсионного рентгеноспектрального микроанализа Oxford Instruments X-MAX 50.

Петли диэлектрического гистерезиса (зависимости $P(E)$) при $f = 1... 10^3$ Hz получали с помощью анализатора TF Analyzer 2000. Это позволяло оценить величину остаточной поляризации (P_R).

Температурные зависимости относительной диэлектрической проницаемости, ϵ'/ϵ_0 (ϵ_0 – электрическая постоянная) при $T = 300\text{--}700$ К на частоте $f = 10^6$ Hz при напряжении $U = 0,04$ В получали с помощью измерительного стенда на базе LCR-метра Agilent 4980A.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В работе [15] показано, что исследуемая пленка является однофазной и обладает ярко выраженной аксиальной текстурой (то есть направление [001] перпендикулярно поверхности пленки), а при комнатной температуре, как и в материале распыляемой керамической мишени, параметр элементарной ячейки $c = 3,945$ Å. На рисунке 1 приведены электронно-микроскопическое изображение скола гетероструктуры Al/BSN-50/Pt/Si и соответствующие ему профили распределения интенсивностей характеристического рентгеновского излучения основных элементов гетероструктуры (Al, Nb, Ba, Sr, Pt и Si). Видно, что слои гетероструктуры имеют хорошую адгезию друг к другу и к подложке Si,

а общая шероховатость поверхности не превышает 50 nm. Толщины слоев металлизации Pt и Al составляют 300 nm и 150 nm соответственно. Пленка BSN-50 имеет толщину 2,9 μm , являясь монокристаллической по толщине. Распределения структурообразующих элементов Ba, Sr, Nb и O по толщине пленки являются однородными, что наглядно продемонстрировано на рисунке 1, профилями интенсивности характеристического рентгеновского излучения. Диффузия элементов между слоями гетероструктуры не выявлена. Количественный анализ характеристического рентгеновского спектра показал, что соотношение катионного состава, с точностью до погрешности метода измерения, соответствует составу $\text{Ba}_{0,5}\text{Sr}_{0,5}\text{Nb}_2\text{O}_6$.

На рисунке 2 приведены зависимости $\epsilon'/\epsilon_0(T)$, $(\epsilon'/\epsilon_0)^{-1}(T)$ и $P_r(T)$ исследуемой гетероструктуры при $T = 280\text{--}475$ К. Видно, что зависимость $\epsilon'/\epsilon_0(T)$ носит куполообразный характер с максимумом при $T_m = 334$ К, ширина максимума на полувысоте $\Delta T = 263$ К, что свидетельствует о сильном размытии сегнето-параэлектрического фазового перехода, свойственного и объемным (моно- и

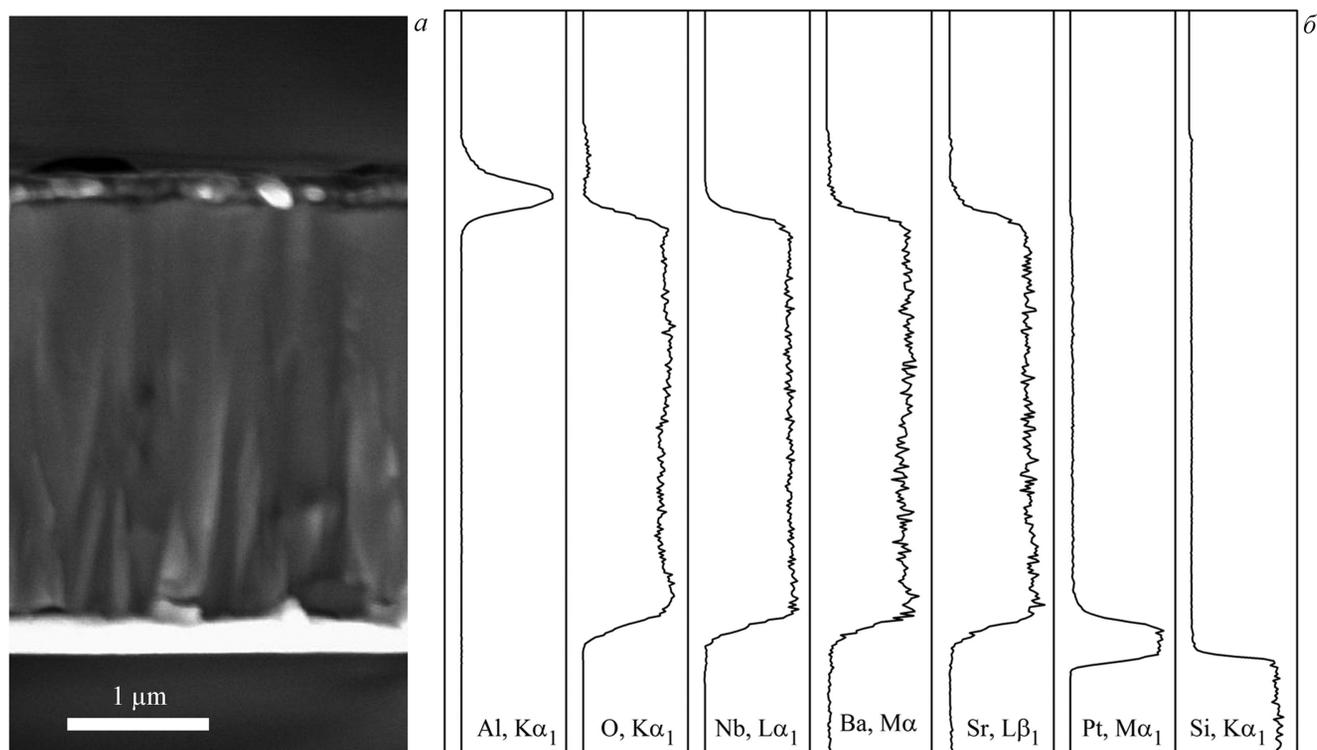


Рис. 1. Электронно-микроскопическое изображение скола гетероструктуры Al/BSN/Pt/Si (а) и профили интенсивности характеристического рентгеновского излучения составляющих элементов по толщине (б)

Fig. 1. Cross-section SEM image of the Al/BSN/Pt/Si heterostructure (a) and characteristic X-rays intensity contours for the constituents over thickness (b)

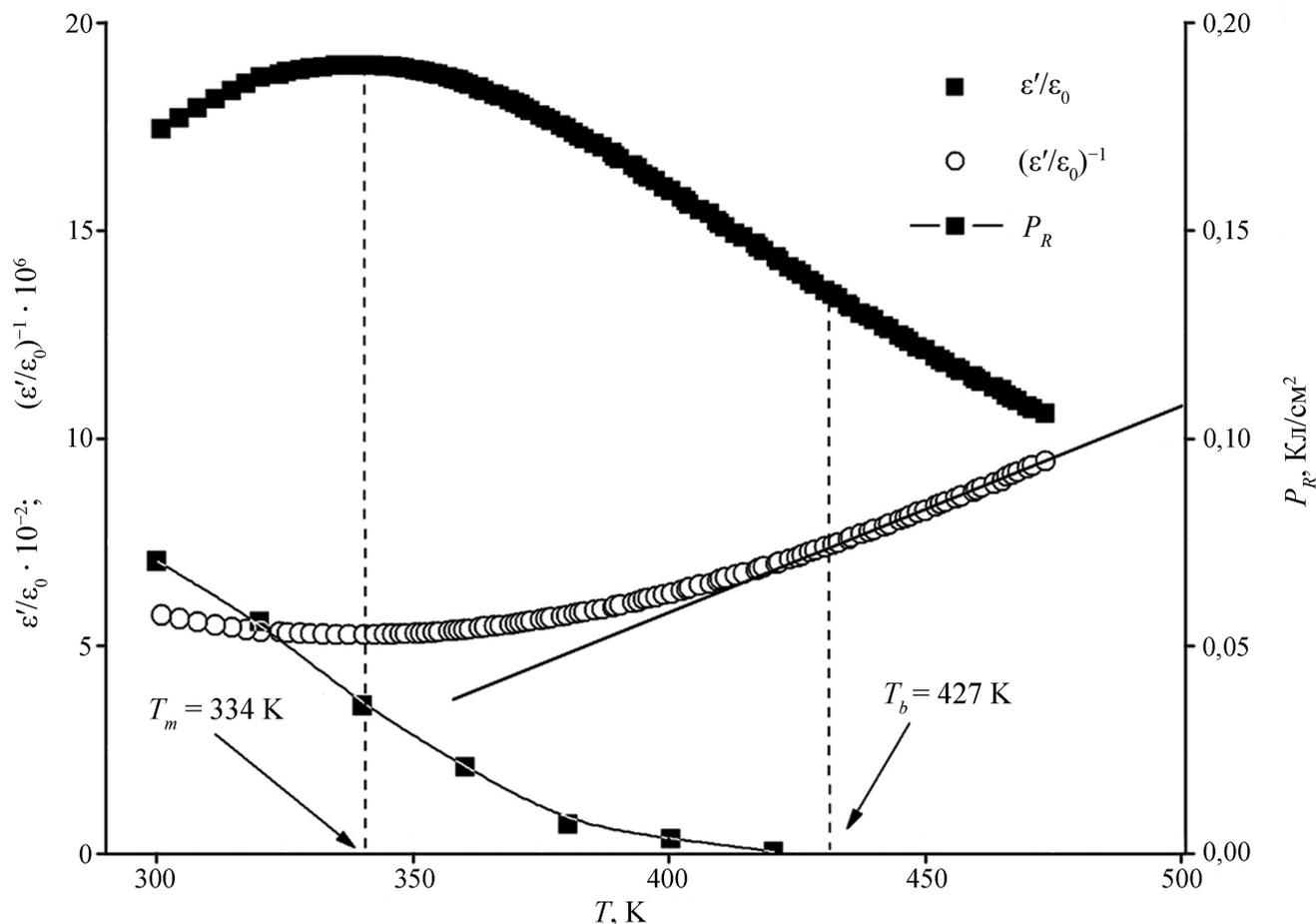


Рис. 2. Зависимости $\epsilon'/\epsilon_0(T)$, $(\epsilon'/\epsilon_0)^{-1}(T)$ (по [15]) и $P_R(T)$ гетероструктуры Al/SBN/Pt/Si при $T = 280\text{--}475$ К на частоте $f = 106$ Hz
Fig. 2. Temperature dependences of $\epsilon'/\epsilon_0(T)$, $(\epsilon'/\epsilon_0)^{-1}(T)$ (by [15]) and $P_R(T)$ of the Al/SBN/Pt/Si heterostructure in the temperature range 280–475 K measured on $f = 106$ Hz

поликристаллическим) образцам BSN-50 [16]. Однако в керамике BSN-50 значения температуры максимума диэлектрической проницаемости выше, чем в пленках ($T_m = 358\text{--}383$ К), а степень размытия фазового перехода в них значительно меньше ($\Delta T < 100$ К) [16]. Закон Кюри – Вейсса на зависимости $(\epsilon'/\epsilon_0)^{-1}(T)$ начинает выполняться лишь при $T_b \geq 427$ К, начиная с которой в образце не удастся фиксировать петли диэлектрического гистерезиса (зависимость $P_R(T)$ (рис. 2) плавно снижается до нуля при $T = 300\text{--}430$ К), а зависимость параметра c элементарной ячейки, как было показано в работе [15], практически линейно возрастает. Все это говорит о том, что «макроскопически» параэлектрическая фаза в BSN-пленке наступает, по всей видимости, лишь при температурах выше T_b .

Деполаризованные спектры КРС гетероструктуры SBN/Pt/Si, снятые в геометрии обратного рассеяния, при $T = 300\text{--}700$ К приведены на рисунке 3. Рассмотрим правила отбора для фононных

мод в спектрах КРС в случае ниобатов бария – стронция. Ниже температуры Кюри BSN обладает структурой ТВБ с точечной группой $4mm$ (C_{4v}) и пятью формульными единицами в элементарной ячейке. Для них существуют 135 колебательных мод ($3 \cdot 45$), включая 3 акустические моды. Из пяти неприводимых представлений A_1 , A_2 , B_1 , B_2 и E только A_2 является неактивным и в КРС, и в ИК-спектре. Моды симметрии B активны в КРС, а моды A_1 и E активны и в КРС, и в ИК. Однако соответствующие линии, наблюдаемые в экспериментальных спектрах кристаллов BSN [8] и в нашем случае (рис. 3), достаточно широки, а их количество значительно меньше теоретически предсказанных мод [11]. Это связывается в первую очередь с катионной неупорядоченностью в структуре ТВБ [3], и, как следствие, с нарушением правил отбора по волновому вектору в центре зоны Бриллюэна [9]. Так как в элементарной ячейке BSN существуют 132 оптические фононные

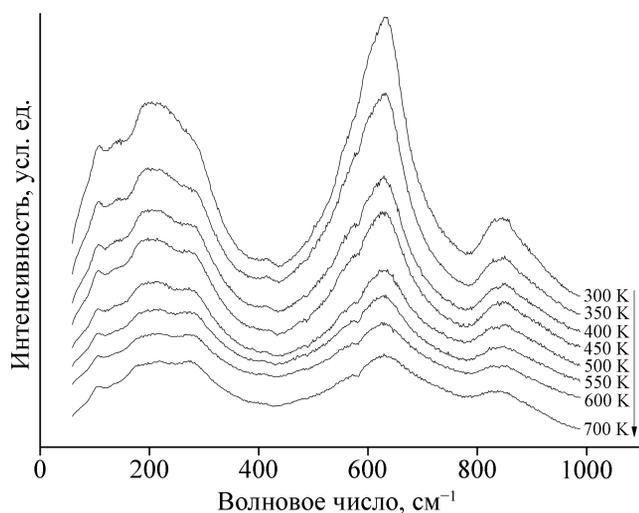


Рис. 3. Спектры КРС пленки BSN-50/Pt/Si при $T = 300\text{--}700\text{ K}$
 Fig. 3. Raman spectra of the BSN-50/Pt/Si film in the temperature range 300–700 K

моды, то возможно вырождение некоторых из них в одну полосу, что вносит дополнительный вклад в уширение КРС-спектра. Все это позволяет изучить только ограниченное число спектральных особенностей.

Видно, что наибольший вклад в интенсивность спектра пленки BSN (рис. 3) вносят три широкие полосы в районе 230 cm^{-1} , 630 cm^{-1} и 850 cm^{-1} , каждая из которых состоит из набора линий (линии от подложки Si экранируются слоем платины). Для определения параметров отдельных фононов проводилась аппроксимация экспериментального спектра набором аддитивных не взаимодействующих гармонических осцилляторов. Для этого была выполнена процедура аппроксимации спектров по методу наименьших квадратов (при помощи программы Fityk [17]) с коррекцией спектров на температурный фактор Бозе – Эйнштейна (для корректного сравнения спектров, полученных при разной температуре):

$$n(\omega, T) = (e^{h\omega/kT} - 1)^{-1}. \quad (1)$$

При описании фононных мод использовалась модель аддитивных гармонических осцилляторов с амплитудой A и затуханием Γ :

$$I(\omega, T) = A(n(\omega, T) + 1)\text{Im}G(\omega), \quad (2)$$

$$G(\omega) = (\omega_0^2 - \omega^2 + i\Gamma\omega)^{-1}. \quad (3)$$

Разложив данный спектр на компоненты, показанные на рисунке 4, можно выделить как минимум 13 мод с частотами $\nu_1\text{--}\nu_{13}$. Две интенсивные полосы в районе 210 cm^{-1} и 630 cm^{-1} ,

наблюдавшиеся и в ряде других сегнетоэлектрических кристаллов, как показано в работе [5], можно отнести к внутренним колебаниям NbO_3 октаэдра, соответствующим движению ионов вдоль оси Z .

Широкую полосу на частоте 630 cm^{-1} , как видно из рисунка 4, можно разложить на две компоненты ν_8 и ν_9 . Так как в элементарной ячейке BSN существует восемь $[\text{NbO}_6]^{II}$ октаэдров (в В2-позициях) и два октаэдра $[\text{NbO}_6]^I$ (в В1-позициях) [10], то более интенсивную линию ν_9 разумно связать с колебаниями $[\text{NbO}_6]^{II}$, а менее интенсивную ν_8 – с колебаниями октаэдров $[\text{NbO}_6]^I$.

В спектрах КРС обнаружена слабая полоса (850 cm^{-1}), которая менее чувствительна к температурным изменениям в процессе фазового перехода, так как вносит небольшой вклад в поляризацию [10].

Линии ν_8 и ν_9 являются фононными модами симметрии A_1 и поляризованы вдоль оси Z , вдоль которой атомы должны смещаться в процессе фазового перехода. Поэтому мы сконцентрировались на анализе ν_8 - и ν_9 -фононов для изучения фазового перехода в BSN-пленке. Между тем полоса $\nu_3\text{--}\nu_5$ (254 cm^{-1}) при увеличении температуры сдвигается к низким частотам и уширяется. Сдвиг и уширение этих линий в спектрах КРС, с нашей точки зрения, могут быть обусловлены многими факторами, такими как беспорядок и деформация кристаллической решетки пленки BSN, и в рамках данной работы не анализировались. Отметим также, что в сравнении с классическими сегнетоэлектриками (например BaTiO_3 и его ТР [7]) в исследуемых пленках, так же, как и в ряде релаксорных соединений, мягкая мода не наблюдалась [18].

Как правило, при фазовых переходах наблюдается резкое изменение формы температурной зависимости частот и полуширин различных фононных мод в спектрах КРС [7]. На рисунках 4а и 4б показана область спектра $450\text{--}700\text{ cm}^{-1}$ (при температурах 400 и 500 К), в которой происходит измерение при фазовом переходе. А из анализа параметров линий (рис. 5) видно, что полоса в районе 630 cm^{-1} (моды ν_8 и ν_9) линейно уширяется с температурой, а ее наклон меняется в параэлектрической фазе. Такое изменение наклона полуширины может быть использовано для определения температуры T_c фазового перехода [10; 12]. При фазовом переходе в окрестности T_m на зависимостях $\nu_8(T)$ и $\nu_9(T)$

наблюдаются аномалии. Как видно из рисунка 5, при повышении температуры в интервале $T < T_m$ происходит плавное снижение частот ν_8 и ν_9 , а при температурах $T_m < T < T_b$ происходит резкое изменение наклона температурной зависимости

частот. При $T > T_m$ происходит незначительное увеличение частоты ν_8 и уменьшение частоты ν_9 . Полуширины обеих линий линейно увеличиваются с ростом температуры, однако в окрестности T_b наклон данной зависимости изменятся.

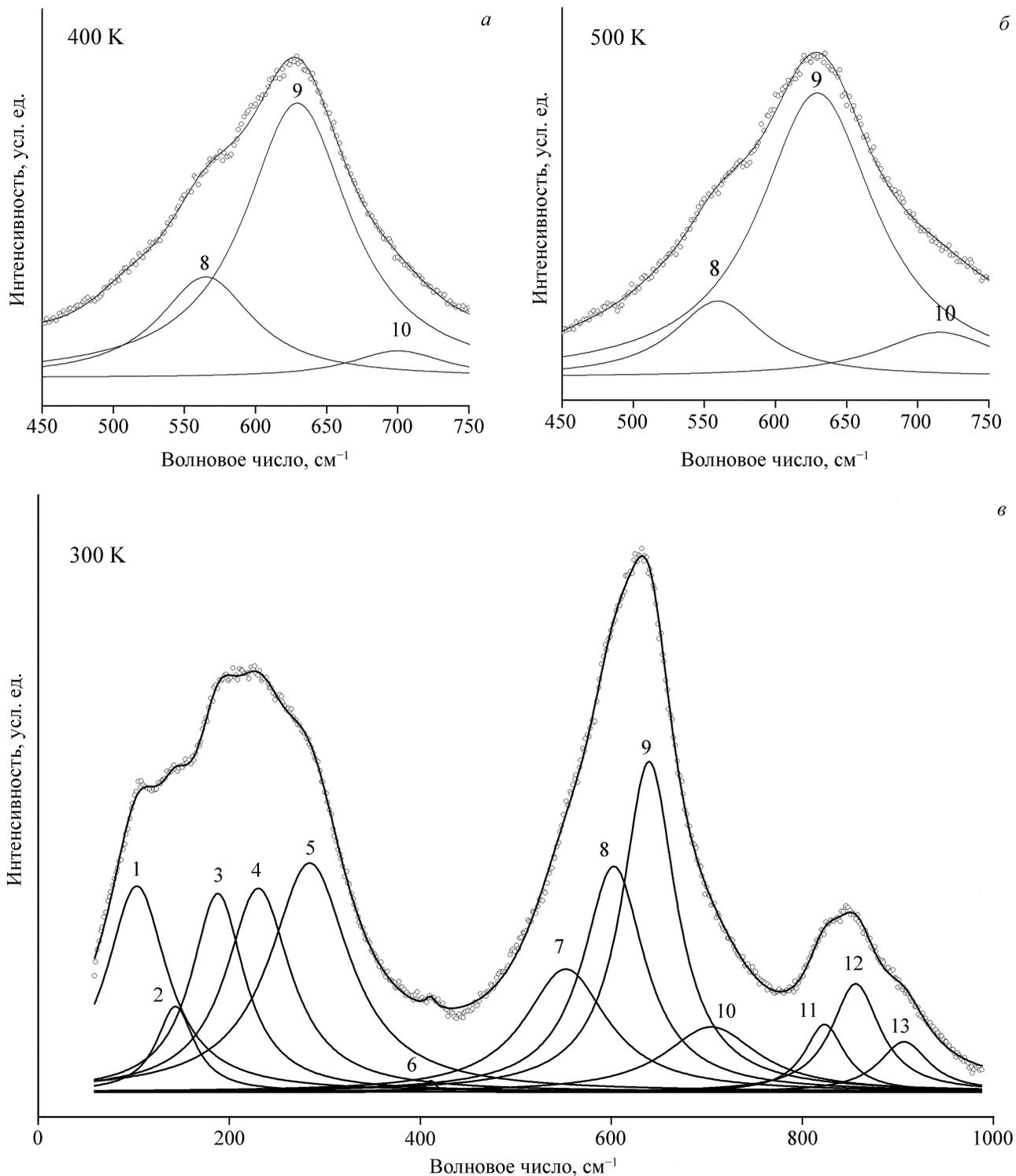


Рис. 4. Анализ спектров КРС пленки BSN при температуре 300, 400 и 500 К

Fig. 4. Analysis of Raman spectra of the BSN film at a temperature of 300, 400, and 500 K

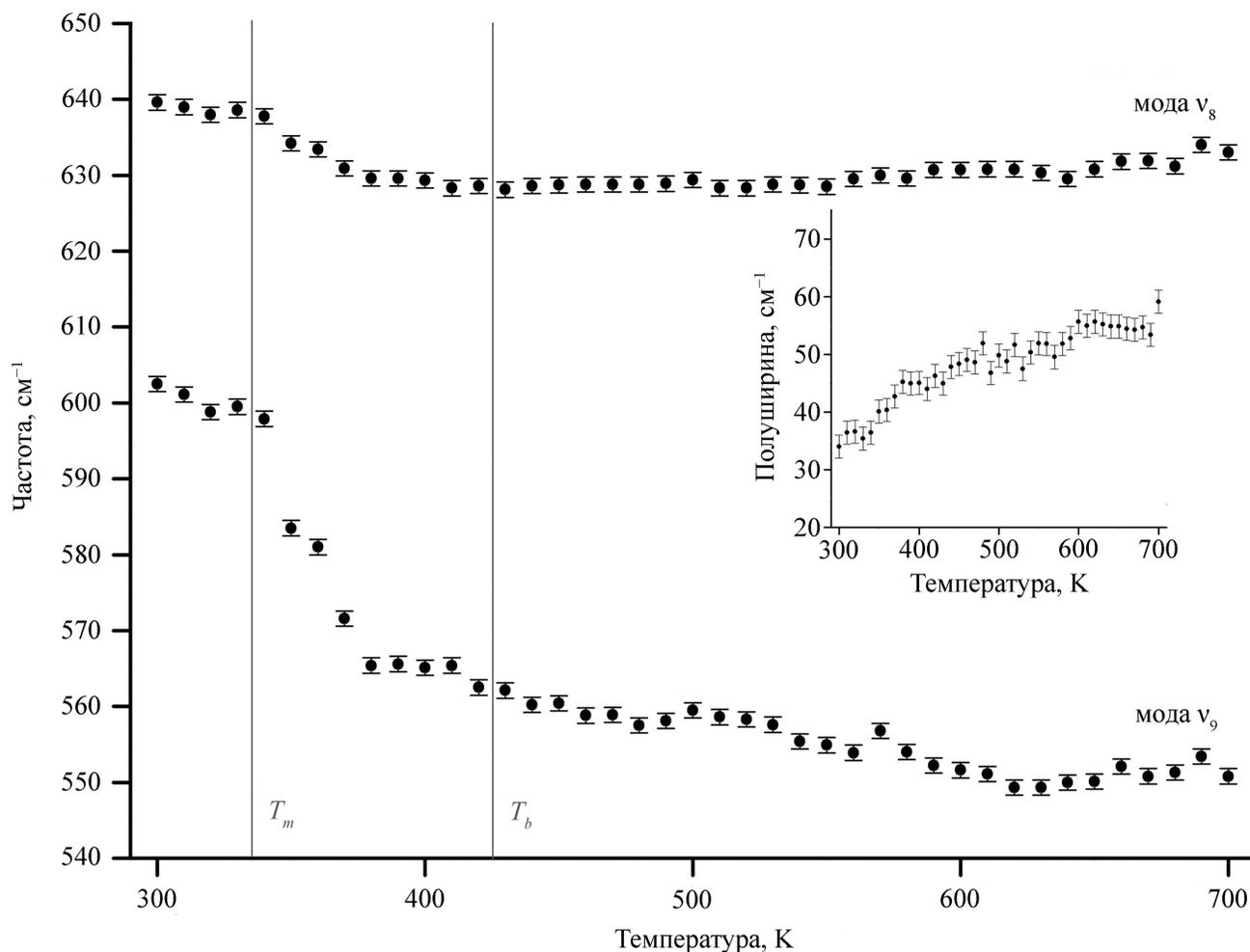


Рис. 5. Температурная зависимость частоты и полуширины моды ν_8 и ν_9 , отмеченная область является интервалом размытого фазового перехода

Fig. 5. Temperature dependence of the frequency and half-width of the ν_8 and ν_9 modes, the marked region is the interval of the diffuse phase transition

ВЫВОДЫ

В настоящей работе изучена динамика решетки пленок сегнетоэлектрика-релаксора $\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Nb}_2\text{O}_6$ в широком диапазоне температур. Обнаружен сегнетоэлектрический фазовый переход и его область размытия по данным спектроскопии КРС и диэлектрических измерений. Полученные

результаты разумно использовать при изучении гетероструктур на основе пленок ниобатов бария – стронция.

Работа выполнена в рамках государственного задания Южного научного центра РАН (№ госрегистрации 01201354247) и гранта РФФИ № 16-32-60095 мол_а_дк.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воротилов К.А., Мухортов В.М., Сигов А.С. 2011. *Интегрированные сегнетоэлектрические устройства*. М., Энергоатомиздат: 175 с.
2. Кузьминов Ю.С. 1982. *Сегнетоэлектрические кристаллы для управления лазерным излучением*. М., Наука: 400 с.
3. Jamieson P.B. 1968. Ferroelectric Tungsten Bronze-Type Crystal Structures. I. Barium Strontium Niobate $\text{Ba}_{0.27}\text{Sr}_{0.73}\text{Nb}_2\text{O}_6$. *The Journal of Chemical Physics*. 48(11): 5048–5057. doi: 10.1063/1.1668176
4. Волк Т.Р., Салобутин В.Ю., Ивлева Л.И., Полозков Н.М., Панкрат Р., Вёлеке М. 2000. Сегнетоэлектрические свойства кристаллов ниобата бария-стронция с примесями некоторых редкоземельных металлов. *Физика твердого тела*. 42(11): 2066–2073.
5. Bartlett K.G., Wall L.S. 1973. Temperature study of the polarized Raman spectra of strontium barium niobate. *Journal of Applied Physics*. 44(11): 5192–5193. doi: 10.1063/1.1662124
6. Анохин А.С., Головки Ю.И., Широков В.Б., Мухортов В.М., Юзюк Ю.И. 2012. Динамика решетки эпитаксиальной пленки титаната бария-стронция во внешнем электрическом поле. *Вестник Южного научного центра*. 8(3): 22–31.

7. Анохин А.С., Разумная А.Г., Юзюк Ю.И., Головки Ю.И., Мухортов В.М. 2016. Фазовые переходы в пленках титаната бария-стронция на подложках MgO различной ориентации. *Физика твердого тела*. 58(10): 1956–1963.
8. Amzallag E., Chang T.S., Pantell R.H., Feigelson R.S. 1971. Raman Scattering by $\text{SrBa}_{1-x}\text{Nb}_2\text{O}_6$. *Journal of Applied Physics*. 42(8): 3254–3256. doi: 10.1063/1.1660719
9. Wilde R.E. 1991. Raman spectrum of $\text{Sr}_{0.61}\text{Ba}_{0.39}\text{Nb}_2\text{O}_6$. *Journal of Raman Spectroscopy*. 22: 321–325. doi: 10.1002/jrs.1250220604
10. Speghini A., Bettinelli M., Caldiño U., Ramírez M.O., Jaque D., Bausá L.E., Solé J.G. 2006. Phase transition in $\text{SrBa}_{1-x}\text{Nb}_2\text{O}_6$ ferroelectric crystals probed by Raman spectroscopy. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 39: 4930–4934. doi: 10.1088/0022-3727/39/23/005
11. Samanta K., Arora A.K., Ravindran T.R., Ganesamoorthy S., Kitamura K., Takekawa S. 2012. Raman spectroscopic study of structural transition in $\text{SrBa}_{1-x}\text{Nb}_2\text{O}_6$ single crystals. *Vibrational Spectroscopy*. 62: 273–278. doi: 10.1016/j.vibspec.2012.07.002
12. Kasprovicz D., Runka T., Speghini A., Falcomer D., Garcia Solé J., Bettinelli M. 2008. Lanthanide-doped strontium barium niobate (SBN) materials: A vibrational investigation. *Journal of Luminescence*. 128: 985–987. doi: 10.1016/j.jlumin.2007.12.007
13. Abdelli F., Boudaya C., Khemakhem H. 2016. Microstructure, X-ray diffraction, dielectric and Raman spectroscopy studies of $\text{Ca}_x\text{Sr}_{1-(y+x)}\text{Ba}_{1-(y+x)}\text{Nb}_2\text{O}_6$ ceramics. *Journal of Alloys and Compounds*. 683: 282–291. doi: 10.1016/j.jallcom.2016.04.189
14. Mukhortov V.M., Golovko Y.I., Tolmachev G.N., Klevtzov A.N. 2000. The synthesis mechanism of complex oxide films formed in dense RF – plasma by reactive sputtering of stoichiometric targets. *Ferroelectrics*. 247: 75–83. doi: 10.1080/00150190008214943
15. Павленко А.В., Захарченко И.Н., Анохин А.С., Куприна Ю.А., Киселева Л.И., Юзюк Ю.И. 2017. Структура, динамика решеткой и диэлектрические характеристики пленок $\text{Sr}_{0.5}\text{Ba}_{0.5}\text{Nb}_2\text{O}_6$. *Физика твердого тела*. 59(5): 888–891. doi: 10.21883/FTT.2017.05.44376.382
16. Павленко А.В., Абубакаров А.Г., Резниченко Л.А., Алиев И.М., Шилкина Л.А., Назаренко А.В., Вербенко И.А., Константинов Г.М. 2015. Зеренная структура и диэлектрические характеристики керамики $(\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5})\text{Nb}_2\text{O}_6$. *Журнал технической физики*. 85(8): 80–84.
17. Wojdyr M. 2010. Fityk: A general-purpose peak fitting program. *Journal of Applied Crystallography*. 43: 1126–1128. doi: 10.1107/S0021889810030499
18. Lines M.E., Glass A.M. 1977. *Principles and Applications of Ferroelectrics and Related Materials*. Oxford, Clarendon Press: 684 p.
4. Volk T.R., Salobutin V.Yu., Ivleva L.I., Polozkov N.M., Pankrath R., Woehlecke M. 2000. Ferroelectric properties of strontium barium niobate crystals doped with rare-earth metals. *Physics of the Solid State*. 42(11): 2129–2136. doi: 10.1134/1.1324052
5. Bartlett K.G., Wall L.S. 1973. Temperature study of the polarized Raman spectra of strontium barium niobate. *Journal of Applied Physics*. 44(11): 5192–5193. doi: 10.1063/1.1662124
6. Anokhin A.S., Golovko Yu.I., Shirokov V.B., Mukhortov V.M., Yuzyuk Yu.I. 2012. [The lattice dynamics of epitaxial barium strontium titanate film under external electric field]. *Vestnik Yuzhnogo nauchnogo tsentra*. 8(3): 22–31. (In Russian).
7. Anokhin A.S., Razumnaya A.G., Yuzyuk Yu.I., Golovko Yu.I., Mukhortov V.M. 2016. Phase transitions in barium–strontium titanate films on MgO substrates with various orientations. *Physics of the Solid State*. 58(10): 2027–2034. doi: 10.1134/S1063783416100048
8. Amzallag E., Chang T.S., Pantell R.H., Feigelson R.S. 1971. Raman Scattering by $\text{SrBa}_{1-x}\text{Nb}_2\text{O}_6$. *Journal of Applied Physics*. 42(8): 3254–3256. doi: 10.1063/1.1660719
9. Wilde R.E. 1991. Raman spectrum of $\text{Sr}_{0.61}\text{Ba}_{0.39}\text{Nb}_2\text{O}_6$. *Journal of Raman Spectroscopy*. 22: 321–325. doi: 10.1002/jrs.1250220604
10. Speghini A., Bettinelli M., Caldiño U., Ramírez M.O., Jaque D., Bausá L.E., Solé J.G. 2006. Phase transition in $\text{SrBa}_{1-x}\text{Nb}_2\text{O}_6$ ferroelectric crystals probed by Raman spectroscopy. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 39: 4930–4934. doi: 10.1088/0022-3727/39/23/005
11. Samanta K., Arora A.K., Ravindran T.R., Ganesamoorthy S., Kitamura K., Takekawa S. 2012. Raman spectroscopic study of structural transition in $\text{SrBa}_{1-x}\text{Nb}_2\text{O}_6$ single crystals. *Vibrational Spectroscopy*. 62: 273–278. doi: 10.1016/j.vibspec.2012.07.002
12. Kasprovicz D., Runka T., Speghini A., Falcomer D., Garcia Solé J., Bettinelli M. 2008. Lanthanide-doped strontium barium niobate (SBN) materials: A vibrational investigation. *Journal of Luminescence*. 128: 985–987. doi: 10.1016/j.jlumin.2007.12.007
13. Abdelli F., Boudaya C., Khemakhem H. 2016. Microstructure, X-ray diffraction, dielectric and Raman spectroscopy studies of $\text{Ca}_x\text{Sr}_{1-(y+x)}\text{Ba}_{1-(y+x)}\text{Nb}_2\text{O}_6$ ceramics. *Journal of Alloys and Compounds*. 683: 282–291. doi: 10.1016/j.jallcom.2016.04.189
14. Mukhortov V.M., Golovko Y.I., Tolmachev G.N., Klevtzov A.N. 2000. The synthesis mechanism of complex oxide films formed in dense RF – plasma by reactive sputtering of stoichiometric targets. *Ferroelectrics*. 247: 75–83. doi: 10.1080/00150190008214943
15. Pavlenko A.V., Zakharchenko I.N., Anokhin A.S., Kuprina Yu.A., Kiseleva L.I., Yuzyuk Yu.I. 2017. Structure, the lattice dynamic, and the dielectric characteristics of $\text{Sr}_{0.5}\text{Ba}_{0.5}\text{Nb}_2\text{O}_6$ films. *Physics of the Solid State*. 59(5): 909–913. doi: 10.1134/S1063783417050249
16. Pavlenko A.V., Abubakarov A.G., Reznichenko L.A., Aliiev I.M., Shilkina L.A., Nazarenko A.V., Verbenko I.A., Konstantinov G.M. 2015. Granular structure and dielectric characteristics of the $(\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5})\text{Nb}_2\text{O}_6$ ceramics. *Technical Physics*. 85(8): 1184–1188. doi: 10.1134/S1063784215080198
17. Wojdyr M. 2010. Fityk: A general-purpose peak fitting program. *Journal of Applied Crystallography*. 43: 1126–1128. doi: 10.1107/S0021889810030499
18. Lines M.E., Glass A.M. 1977. *Principles and Applications of Ferroelectrics and Related Materials*. Oxford, Clarendon Press: 684 p.

REFERENCES

1. Vorotilov K.A., Mukhortov V.M., Sigov A.S. 2011. *Integrirovannyye segnetoelektricheskie ustroystva. [Integrated ferroelectric devices]*. Moscow, Energoatomizdat: 175 p. (In Russian).
2. Kuz'minov Yu.S. 1982. *Segnetoelektricheskie kristally dlya upravleniya lazernym izlucheniem. [Ferroelectric crystals for the control of laser radiation]*. Moscow, Nauka: 400 p. (In Russian).
3. Jamieson P.B. 1968. Ferroelectric Tungsten Bronze-Type Crystal Structures. I. Barium Strontium Niobate $\text{Ba}_{0.27}\text{Sr}_{0.73}\text{Nb}_2\text{O}_6$. *The Journal of Chemical Physics*. 48(11): 5048–5057. doi: 10.1063/1.1668176

Поступила 17.01.2017