

Получение, кристаллическая структура и сегнетоэлектрические свойства наноразмерных пленок $Ba_2NdFeNb_4O_{15}/Si(001)$

© 2024 г. А. В. Павленко¹, Д. В. Стрюков¹, С. С. Старухина²,
Т. С. Ильина², Д. А. Киселев²

¹ *Федеральный исследовательский центр
Южный научный центр Российской академии наук,
просп. Чехова, д. 41, Ростов–на–Дону, 344006, Российская Федерация*

² *Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»,
Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Москва, 119049, Российская Федерация*

✉ Автор для переписки: antvpr@mail.ru

Аннотация. Тонкие пленки феррониобата бария–ниодима ($Ba_2NdFeNb_4O_{15}$) толщинами от 75 до 1000 нм были выращены методом высокочастотного катодного распыления на монокристаллических подложках Si(001) в кислородной атмосфере. Исследованы их кристаллическая структура, морфология поверхности, диэлектрические характеристики и особенностей формирования сегнетоэлектрического состояния. Установлено что пленки являются поликристаллическими текстурированными с преимущественной ориентацией осей [001] в направлении нормали к поверхности подложки, в которых наблюдалась существенная деформация элементарной ячейки. Обнаружено, что с увеличением толщины пленок шероховатость их поверхности увеличивается и следует закону масштабирования. Из вольт–фарадных характеристик (по величине смещения и ширине гистерезиса) установлено, что с уменьшением толщины происходит увеличение коэрцитивного поля и возрастает внутреннее поле. Это также было подтверждено измерением локальных остаточных петель гистерезиса методом силовой микроскопии пьезоотклика. Кроме того, локальным приложением положительного и отрицательного внешнего поля удается сформировать поляризованные области, в которых в одном случае вектор поляризации направлен от подложки к поверхности пленки, а в другом, наоборот, от пленки к подложке. Также, был определен эффективный пьезоэлектрический коэффициент для всех исследованных гетероструктур. Обсуждаются причины выявленных закономерностей.

Ключевые слова: тетрагональная вольфрамовая бронза, BNFNO мультиферроик, диэлектрические характеристики, сканирующая зондовая микроскопия, поляризация

Благодарности: Исследования структуры и диэлектрических характеристик объектов были выполнены в рамках реализации ГЗ ЮНЦ РАН № гр. Проекта 122020100294-9. Исследования методом сканирующей зондовой микроскопии выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания (проект № FSME-2024-0001).

Для цитирования: Павленко А.В., Стрюков Д.В., Старухина С.С., Ильина Т.С., Киселев Д.А. Получение, кристаллическая структура и сегнетоэлектрические свойства наноразмерных пленок $Ba_2NdFeNb_4O_{15}/Si(001)$. *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники.* 2024; 27(3): 223—231. <https://doi.org/10.17073/1609-3577j.met202406.593>

Synthesis, crystal structure and ferroelectric properties of $\text{Ba}_2\text{NdFeNb}_4\text{O}_{15}/\text{Si}(001)$ films

A. V. Pavlenko¹✉, D. V. Stryukov¹, S. S. Starukhina², T. S. Ilina², D. A. Kiselev²

¹ *Federal Research Center the Southern Scientific Center, Russian Academy of Sciences, 41 Chekhov Ave., Rostov-on-Don 344006, Russian Federation*

² *National University of Science and Technology “MISIS”, 4-1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation*

✉ Corresponding author: antvpr@mail.ru

Abstract. Using the method of HF cathode sputtering in an oxygen atmosphere, $\text{Ba}_2\text{NdFeNb}_4\text{O}_{15}/\text{Si}(001)$ heterostructures with layer thicknesses from 75 to 1000 nm were manufactured. Their crystal structure, surface morphology, dielectric characteristics and features of the formation of the ferroelectric state were investigated. It has been established that the films are polycrystalline textured with a predominant orientation of the axes [001] in the direction normal to the substrate surface, in which a significant deformation of the unit cell was observed. It was found that as the thickness of the films increases, the roughness of their surface increases and follows the scaling law. From the volt–farad characteristics (in terms of displacement and hysteresis width), it was found that with a decrease in thickness, the coercive field increases and the internal field increases. This was also confirmed by measuring local residual hysteresis loops using piezoelectric force microscopy. In addition, by the local application of positive and negative external fields, it is possible to form polarized regions in which, in one case, the polarization vector is directed from the substrate to the surface of the film, and in the other, on the contrary, from the film to the substrate. Also, the effective piezoelectric coefficient was determined for all the studied heterostructures. The reasons for the revealed patterns are discussed.

Keywords: tetragonal tungsten bronze, BNFNO multiferroic, dielectric characteristics, scanning probe microscopy, polarization

Acknowledgments: The studies of the structure and dielectric characteristics of the objects were carried out within the framework of the implementation of the State Assignment of the Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences No. gr. Project 122020100294-9. The studies using scanning probe microscopy methods were carried out with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state assignment (project No. FSME-2024-0001).

For citation: Pavlenko A.V., Stryukov D.V., Starukhina S.S., Ilina T.S., Kiselev D.A. Synthesis, crystal structure and ferroelectric properties of $\text{Ba}_2\text{NdFeNb}_4\text{O}_{15}/\text{Si}(001)$ films. *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoy tekhniki = Materials of Electronics Engineering*. 2024; 27(3): 223–231. <https://doi.org/10.17073/1609-3577j.met202406.593>

Введение

В последние десятилетия сегнетоэлектрики и мультиферроики со структурой тетрагональной вольфрамовой бронзы (ТВБ) привлекают к себе значительное внимание, что обусловлено перспективами их применения в виде монокристаллов и тонких пленок в микроэлектронике, фотонике и СВЧ-технике [1]. $\text{Ba}_2\text{LnFeNb}_4\text{O}_{15}$ (где Ln — редко-

земельный элемент) — представители указанного семейства материалов кислородно-октаэдрического типа, в которых Fe^{3+} или Nb^{5+} занимают центральные позиции, катионы Ba^{2+} — пятиугольные каналы, редкоземельные катионы Ln — четырехугольные каналы [2]. Указанная специфика этих материалов приводит к тому, что в зависимости от химического состава и степени упорядочения катионов в соответствующих позициях среди них

© 2024 National University of Science and Technology “MISIS”.

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

могут быть как классические сегнетоэлектрики, так сегнетоэлектрики–релаксоры [2–4], которые, характеризуются принципиально разным строением доменной структуры, поведением в электрическом поле, характером дисперсии диэлектрической проницаемости и т.д., что важно учитывать при разработке реальных устройств [5]. С точки зрения применения в микроэлектронике особое место занимают гетероструктуры сегнетоэлектрик–полупроводник (**СЭП**), в которых рост функционального материала реализуется напрямую на полупроводниковой подложке [6]. Однако, мультиферроики типа $\text{Ba}_2\text{LnFeNb}_4\text{O}_{15}$ в этом направлении практически не изучены, что может быть обусловлено прежде всего сложностью их получения в виде наноразмерных пленок на таких полупроводниковых подложках, как кремний. Учитывая выше сказанное целью представленной работы явилось получение тонких пленок $\text{Ba}_2\text{NdFeNb}_4\text{O}_{15}$ на монокристаллических подложках $\text{Si}(001)$ и установление закономерностей влияния толщины пленок на кристаллическую структуру, наностроения и их сегнетоэлектрические свойства.

Методы получения и исследования образцов

Пленки $\text{Ba}_2\text{NdFeNb}_4\text{O}_{15}$ (**BNFNO**) различных толщин (75, 250 и 1000 нм) на подложках $\text{Si}(001)$ (КДБ–12) выращивались с использованием метода высокочастотного (**ВЧ**) катодного распыления керамической мишени $\text{Ba}_2\text{NdFeNb}_4\text{O}_{15}$ в атмосфере O_2 согласно технологическим регламентам работы [7]. Рентгендифракционные исследования (фазовый состав, структурное совершенство пленок, параметры элементарной ячейки и ориентаци-

онные соотношения между пленкой и подложкой) осуществлялись на многофункциональном рентгеновском комплексе «РИКОР» (CuK_α -излучение).

Для осуществления измерений сегнетоэлектрических и диэлектрических характеристик образцов в перпендикулярном к поверхности подложки направлении изготавливались конденсаторы металл/BNFNO/Si/металл: металлические электроды Ag/Pd формировались магнетронным распылением в атмосфере аргона (установка Emitech SC7620) через теньевую маску с $d \approx 150$ мкм. Вольт–фарадные характеристики ($C(U)$) для структур МСЭП получали на специализированном анализаторе сегнетоэлектриков TFAalyzer2000 (C образца измерялась при $f = 50$ кГц и $U = 40$ мВ, а частота смещающего напряжения треугольной формы — 1 Гц).

Топография изображения доменной структуры, а также процессы локального переключения пленок получены на сканирующем зондовом микроскопе (**СЗМ**) Ntegra Prima (NT–MDT SI, Россия) в режиме силовой микроскопии пьезоотклика (**СМП**) с использованием кантилеверов NSG10Pt (TipsNano). Обработка и анализ изображений осуществлялась в программе Gwyddion (версия 2.60).

Результаты эксперимента и их обсуждение

Анализ углового положения наблюдаемых рефлексов на θ – 2θ рентгенограммах в интервале углов 20 – 50° (рис. 1) показал, что с учетом [8] обнаруженные рефлексы соответствуют только рассеянию различными кристаллографическими плоскостями $\text{Ba}_2\text{NdFeNb}_4\text{O}_{15}$. Максимальную относительную интенсивность имеют отражения от серии плоскостей типа (001), что указывает на

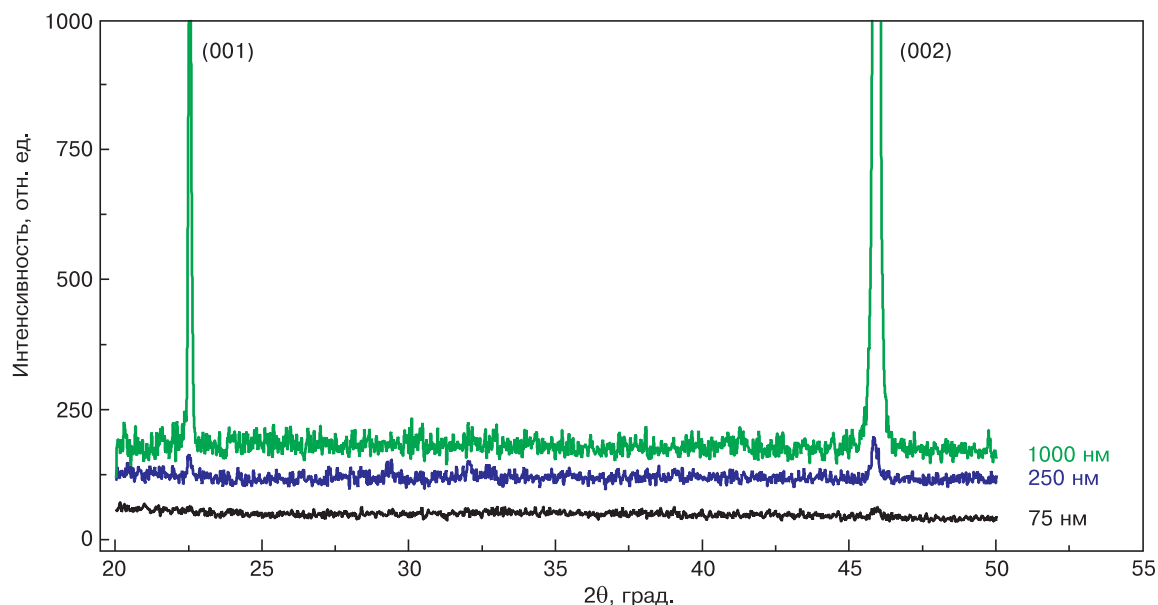


Рис. 1. Рентгенограммы гетероструктур BNFNO/Si(001)

Fig. 1. X-ray diffraction patterns of BNFNO/Si(001) heterostructures

текстурированный рост полученных поликристаллических пленок. Результаты исследования фазового состава и структуры пленок представлены на рис. 1.

Из положений максимумов на рентгенограммах определялись параметры элементарных ячеек в зависимости от толщины пленки. С увеличением толщины параметр в направлении нормали к поверхности подложки с увеличивается с 0,3958 до 0,3969 нм. При сравнении параметров элементарной ячейки пленок с параметрами объемной керамики ($a_{\text{bulk}} = 1,2477$ нм, $c_{\text{bulk}} = 0,3923$ нм) видно, что в направлении нормали к поверхности подложки имеется существенная деформация растяжения,

достигающая ~1,2 % для самой толстой гетеро-структуры.

Текстурированный характер роста пленки BNFNO проявился при их анализе методами СЗМ (рис. 2) — ее поверхность является однородной, отчетливо видны ростовые кристаллиты, имеющие в горизонтальной плоскости форму многогранников, а места стыков — преимущественно плоские.

Включения вторичных фаз, пор и дефектов поверхности не обнаружено. Метод автокорреляционной функции был использован с целью количественной оценки латерального размера зерна [9]. Посредством извлечения из автокорреляционного изображения зависимость радиальноусредненно-

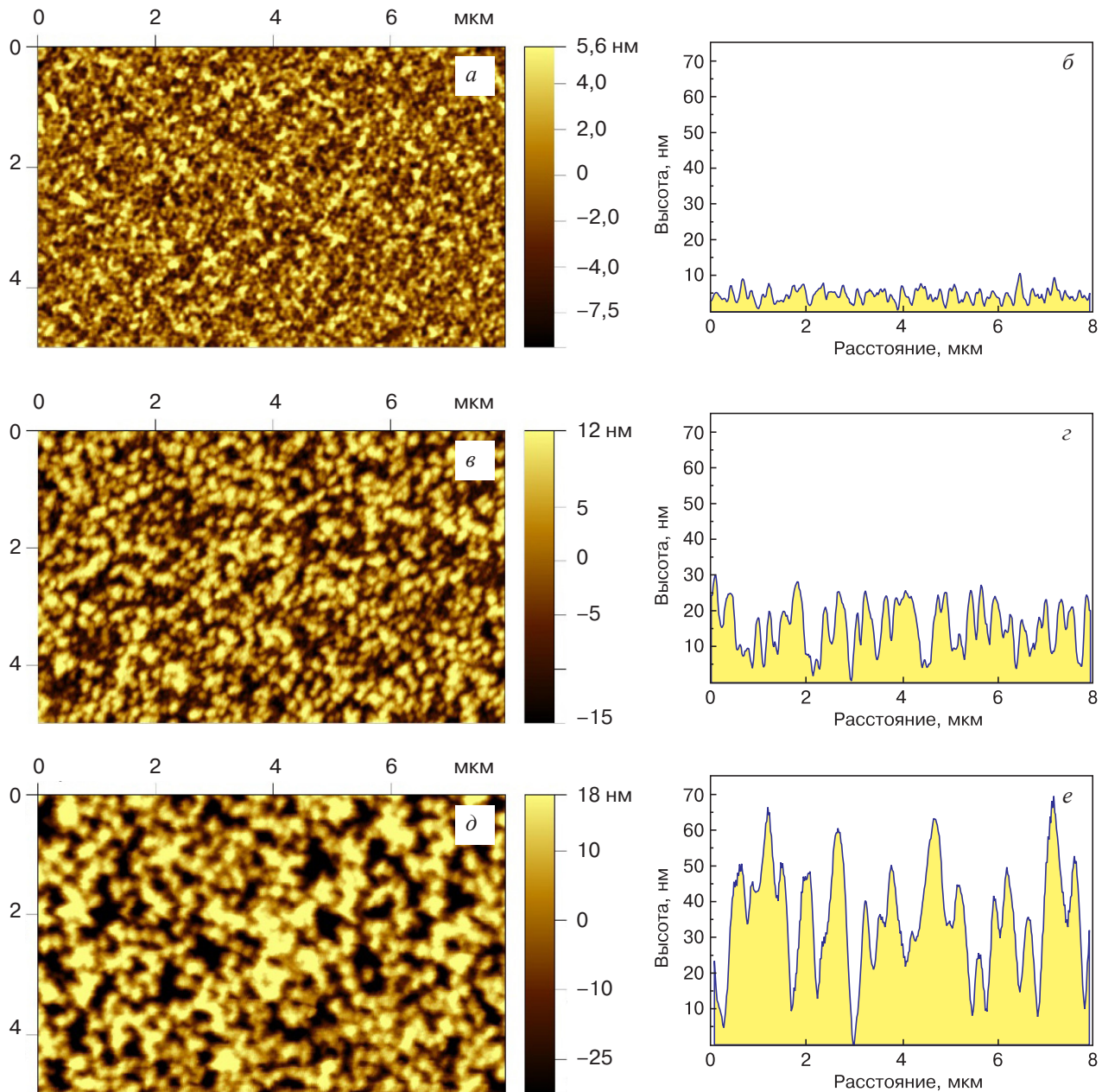


Рис. 2. Топография (а, в, д) и усредненный профиль (б, г, е) для пленок BNFNO различной толщины: а, б — 75 нм; в, г — 250 нм; д, е — 1000 нм

Fig. 2. Topography (a, в, д) and average profile (б, г, е) for BNFNO films of different thickness: (а, б) 75 nm; (в, г) 250 nm; (д, е) 1000 nm

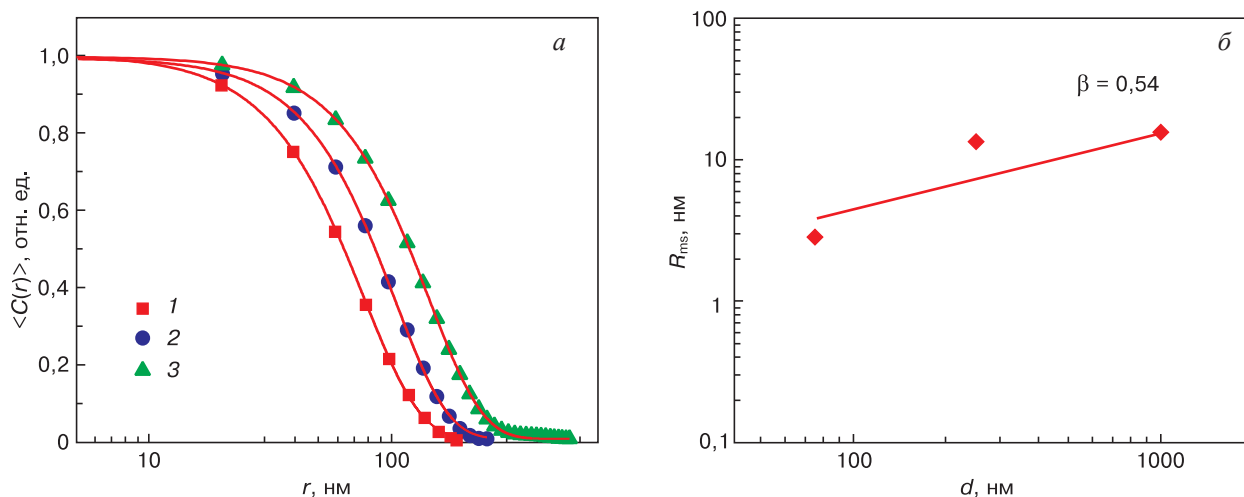


Рис. 3. Профили автокорреляционной функции (точки) и их аппроксимация уравнением (1) (линии) для пленок BNFNO различной толщины (а): 1 — 75 нм; 2 — 250 нм; 3 — 1000 нм; б — зависимость среднеквадратичной шероховатости R_{MS} от толщины пленок BNFNO. Линия — аппроксимация уравнением (2)

Fig. 3. Profiles of the autocorrelation function (points) and their approximation by equation (1) (lines) for BNFNO films of different thicknesses (a): (1) 75 nm; (2) 250 nm; (3) 1000 nm; (b) dependence of the root-mean-square roughness R_{MS} on the thickness of BNFNO films. Line is approximation by equation (2)

го значения искомого параметра представляется возможным определение среднего латерального размера кристаллитов на исследуемой области поверхности пленок BNFNO. Для этого использовано уравнение вида:

$$\langle C(r) \rangle = A \exp \left[- \left(\frac{r}{\langle \xi \rangle} \right)^{2h} \right], \quad (1)$$

где A — константа; r — расстояние от центрального пика (нм), определенное из изображения автокорреляционной функции; ξ — среднее значение размера зерна (нм); h ($0 < h < 1$) — параметр.

На рис. 3, а представлены профили радиально усредненной автокорреляционной функции и аппроксимация, полученная при анализе полученных распределений. Установлено, что в латеральном направлении средний размер кристаллитов для пленок BNFNO толщиной 75, 250 и 1000 нм составил 77, 104 и 145 нм, соответственно.

Рассчитаны значения средней (R_a) и среднеквадратичной шероховатости (R_{MS}) для тонких пленок BNFNO разной толщины, представленные в табл. 1. Анализ морфологии поверхности показал низкие значения R_{MS} для всей серии пленок BNFNO по толщине. По мере увеличения толщины пленки увеличиваются размеры кристаллитов, которые постепенно превращаются в крупные блоки произвольной формы с гладкими границами, а также возрастает шероховатость поверхности. Например, среднеквадратичная шероховатость достигает значения 3 нм для пленки толщиной 75 и 16 нм для самого толстого образца (толщиной 1000 нм), что составляет менее 2 % от общей толщины пленки.

Важным экспериментальным результатом является то, что изменение шероховатости по-

верхности пленок следует закону масштабирования [10]:

$$\sigma = d^\beta, \quad (2)$$

где σ — шероховатость, нм; d — толщина, нм; β — экспонента роста.

Толщина пленок пропорциональна времени роста при постоянной скорости осаждения, что подразумевает линейную зависимость между двумя величинами (толщиной и шероховатостью) в логарифмическом представлении (рис. 3, б). Таким образом, наклон кривой на рис. 3, б позволяет рассчитать коэффициент β — экспоненту роста, которая в нашем случае имеет значение 0,54.

Существует три механизма роста тонких гетерозипитаксиальных пленок: послойный механизм (по Франку—Ван-дер-Мерве), островковый механизм (по Фольмеру—Веберу) и механизм Странски—Крастанова. Морфология поверхности

Таблица 1 / Table 1

Параметры шероховатости поверхности и радиуса зерен пленок BNFNO в зависимости от толщины

Surface roughness and grain radius parameters of BNFNO films depending on thickness

Толщина, нм	R_a , нм	R_{MS} , нм	Радиус зерна, нм
75	2	3	77
250	11	13	104
1000	13	16	145

и ее эволюция с увеличением толщины пленки указывают на островковый механизм роста пленок BNFNO. В этом случае рост пленок происходит путем первоначального образования трехмерных зародышей, которые позже вырастают в сплошную пленку на поверхности подложки Si (001), при этом формируется типичный рельеф пленки.

Результаты измерений $C-V$ -зависимости гетероструктур BNFNO/Si с различной толщиной слоя мультиферроика BNFNO представлены на рис. 4. Так как в МСЭП структурах эффекты памяти, обусловленные процессами переключения поляризации, могут в существенной мере влиять на вид $C(U)$ кривой, гетероструктуры перед измерениями подвергались нагреву до температуры 250 °С, выдерживались 10 мин и в дальнейшем охлаждались до комнатной температуры.

Хорошо видно, что зависимости $C-V$ для всех образцов имеют вид высокочастотных

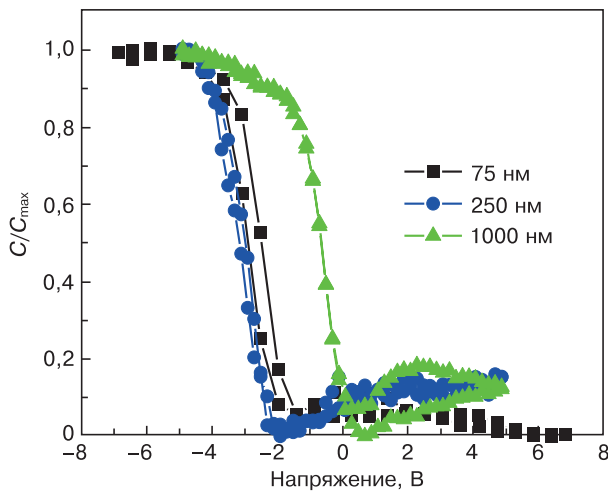
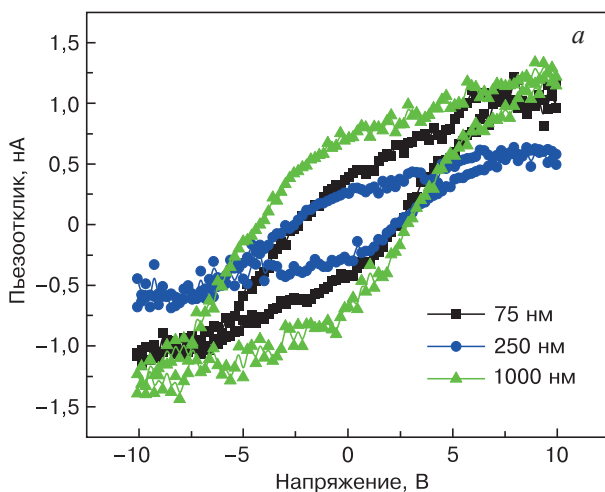


Рис. 4. $C-V$ -зависимости гетероструктур BNFNO/Si при температуре 23 °С
 Fig. 4. $C-V$ dependences of BNFNO/Si heterostructures at a temperature of 23 °С



$C-V$ -характеристик МСЭП и МДП структур, при этом до полевого воздействия для всех толщин емкость структуры минимальна ($C_{min} = 2-3$ пФ) и практически не зависит от толщины пленки BNFNO, что свидетельствует о нахождении поверхности кремниевой подложки в режиме обеднения, и обусловлено проявлением эффекта поля, что обусловлено униполярностью доменного и/или наличием внутреннего поля смещения в пленке. Сопоставление параметров кривых $C(V)$ показало, что по мере уменьшения толщины пленки как величина смещения кривой $C(V)$ в область отрицательных полей, так и ширина гистерезиса (ΔU) возрастают. Это позволяет говорить о том, что в нашем случае по мере снижения толщины d пленки BNFNO с одной стороны происходит увеличение коэрцитивного поля ($\Delta U = 2E_C d$), а с другой — возрастает внутреннее поле.

Аналогичного рода закономерности были обнаружены нами и при исследовании пленок в режиме спектроскопии переключения поляризации в режиме силовой микроскопии пьезоотклика (рис. 5, а). Получены локальные остаточные петли пьезоэлектрического гистерезиса при приложении постоянного напряжения на кантилевер ± 10 В для пленок BNFNO различной толщины вблизи контактного резонанса «кантилевер — образец» ($\sim 0,8$ МГц), после чего были скорректированы с помощью модели простого гармонического осциллятора [11].

По данным локальных остаточных петель гистерезиса рассчитаны значения коэрцитивного поля (E_C) для всех образцов с помощью метода, описанного в [12]. Проведенные расчеты показали, что E_C не является постоянной функцией толщины пленки, как показано на рис. 5, б.

Измеренное коэрцитивное поле резко возрастает с уменьшением толщины d . Расчет показал, что коэрцитивное поле от толщины пленок BNFNO

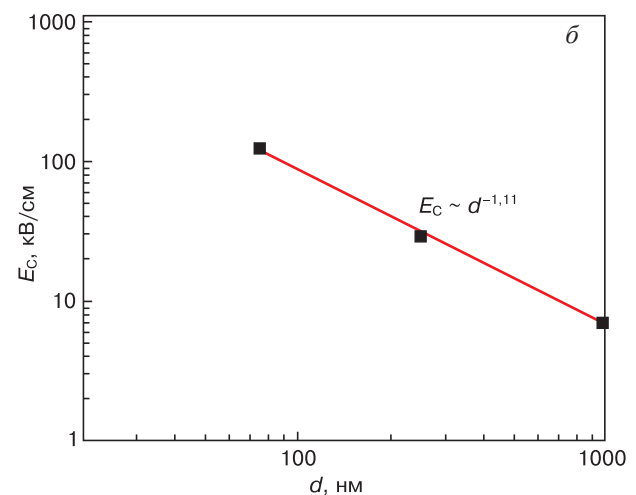
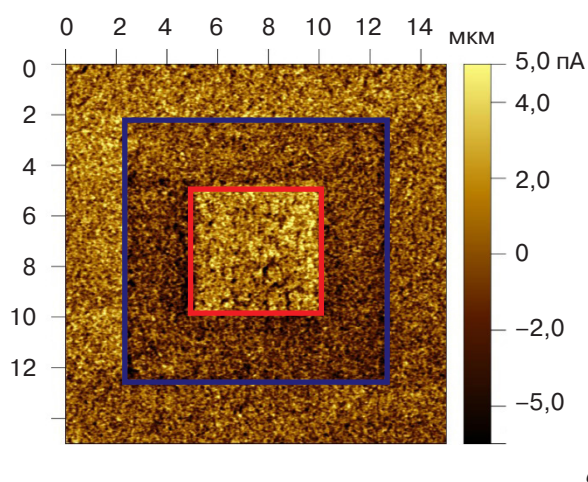


Рис. 5. Петли пьезоэлектрического гистерезиса пленок BNFNO различной толщины (а), зависимость коэрцитивного поля от толщины пленок (б)
 Fig. 5. Piezoelectric hysteresis loops of BNFNO films of different thicknesses (а), dependence of the coercive field on the film thickness (б)

меняется по закону $E_C \propto d^{-1,11}$ (линия на рис. 5, б). Существует несколько моделей, объясняющих зависимость E_C от толщины. Например, модель зарождения доменов [13] предсказывает полуэмпирический закон масштабирования, где $E_C \propto d^{-2/3}$. В некоторых исследованиях [14] рассматриваются эффекты межфазного мертвого слоя между сегнетоэлектрическим слоем и электродами. В этом случае E_C , увеличивается при уменьшении толщины и имеет зависимость $E_C \propto d^{-1}$. Хотя происхождение такого поведения масштабирования все еще обсуждается, эти наблюдения подразумевают его универсальность независимо от методов измерения [15].

На рис. 6, а показано изображение сигнала пьезоэлектрического отклика после поляризации напряжением ± 10 В пленки BNFNO толщиной 250 нм. Наблюдается контраст сигнала пьезоэлектрического отклика между поляризованными областями. «Темные» и «светлые» области свидетельствуют о противоположном направлении вектора поляризации. Анализ фазы пьезоэлектрического сигнала указывает, что «темный» квадрат, поляризованный напряжением -10 В соответствует индуцированной доменной структуре с вектором поляризации, направленным от подложки к поверхности пленки, а «светлый» квадрат (поляризация при $+10$ В) — от поверхности к подложке.

Эффективный пьезоэлектрический коэффициент d_{33} был измерен из линейной зависимости сигнала деформации исследуемых пленок от величины переменного напряжения [16, 17]. На рис. 6, б показан пример расчета d_{33} для пленки BNFNO толщиной 250 нм. Установлено, что значения эффективного пьезоэлектрического коэффициента d_{33} зависят от толщины пленок BNFNO: 10,4 пм/В ($d = 75$ нм), 11,3 пм/В ($d = 250$ нм) и 11,8 пм/В ($d = 1000$ нм).



Заключение

Методом ВЧ-катодного распыления в атмосфере кислорода изготовлены гетероструктуры $\text{Ba}_2\text{NdFeNb}_4\text{O}_{15}/\text{Si}(001)$ с толщинами слоев 75, 250 и 1000 нм. Полученные гетероструктуры имеют текстурированную поликристаллическую структуру с преимущественной ориентацией оси [001]. Элементарные ячейки BNFNO имеют существенную деформация растяжения по сравнению с элементарной ячейкой объемного материала, которая зависит от толщины пленки и достигает 1,2 %. Поверхность гетероструктур была однородной, при этом шероховатость поверхности и размеры кристаллитов зависели от толщины пленки — по мере увеличения толщины увеличиваются как размеры кристаллитов, так и шероховатость поверхности, которая следует закону масштабирования с коэффициентом 0,54. От толщины пленки BNFNO также зависели сегнетоэлектрические характеристики, по мере уменьшения толщины пленки как величина смещения вольт-фарадной кривой в область отрицательных полей, так и ширина ее гистерезиса возрастают. Подобное поведение вольт-фарадных кривых соответствует тому, что с уменьшением толщины происходит увеличение коэрцитивного поля и возрастает внутреннее поле. Эти результаты были дополнительно подтверждены данными локальных остаточных петель гистерезиса полученными в режиме силовой микроскопии пьезоотклика и установлено, что коэрцитивное поле резко возрастает с уменьшением толщины по закону $E_C \propto d^{-1,11}$. Также для всех исследованных гетероструктур были определены значения эффективного пьезоэлектрического коэффициента d_{33} , который увеличивается с ростом толщины пленок с 10,4 пм/В для пленки толщиной 75 нм до 11,8 пм/В для пленки толщиной 1000 нм.

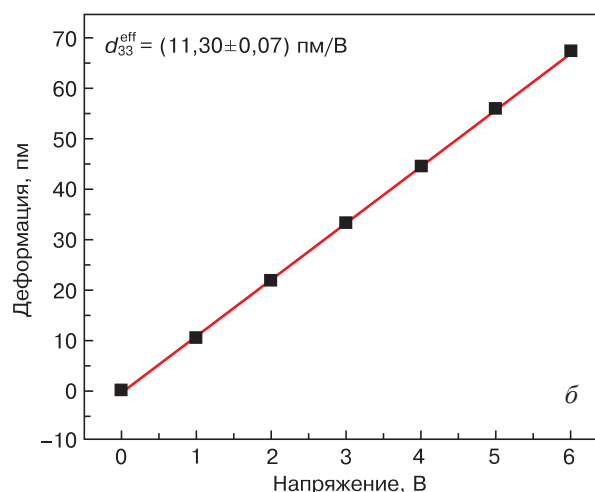


Рис. 6. Сигнал пьезоэлектрического отклика пленки BNFNO толщиной 250 нм после поляризации постоянным напряжением ± 10 В (а), зависимость деформации пленки от приложенного напряжения (б)

Fig. 6. Piezoelectric response signal of a 250 nm thick BNFNO film after polarization with a constant voltage of ± 10 V (а), dependence of film deformation on the applied voltage (б)

Библиографический список / References

1. Павленко А.В., Зинченко С.П., Стрюков Д.В., Ковтун А.П. Наноразмерные пленки ниобата бария–стронция: особенности получения в плазме высокочастотного разряда, структура и физические свойства. Ростов н/Д.: Изд-во ЮНЦ РАН; 2022. 244 с.
1. Pavlenko A.V., Zinchenko S.P., Stryukov D.V., Kovtun A.P. Nanosized films of barium–strontium niobate: features of obtaining in high–frequency discharge plasma, structure and physical properties. Rostov on Don: Izd-vo YuNTs RAN; 2022. 244 p. (In Russ.)
2. Josse M., Bidault O., Roulland F., Castel E., Simon A., Michau D., Von der Mühl R., Nguyen O., Maglione M. The Ba₂LnFeNb₄O₁₅ “tetragonal tungsten bronze”: Towards RT composite multiferroics. *Solid State Sciences*. 2009; 11(6): 1118—1123. <https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2009.02.015>
3. Hajlaoui T., Chabanier C., Harnagea C., Pignolet A. Epitaxial Ba₂NdFeNb₄O₁₅–based multiferroic nanocomposite thin films with tetragonal tungsten bronze structure. *Scripta Materialia*. 2017; 136: 1—5. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2017.04.005>
4. Kinka M., Gabrielaitis D., Albino M., Josse M., Palaimiene E., Grigalaitis R., Maglione M., Banys J. Investigation of dielectric relaxation processes in Ba₂NdFeNb_{4-x}Ta_xO₁₅ ceramics. *Ferroelectrics*. 2015; 485(1): 101—109. <https://doi.org/10.1080/00150193.2015.1061348>
5. Fernandez A., Acharya M., Lee H.–G., Schimpf J., Jiang Y., Lou D., Tian Z., Martin L.W. Thin–film ferroelectrics. *Advanced Materials*. 2022; 34(30): 2108841. <https://doi.org/10.1002/adma.202108841>
6. Mikolajick T., Slesazek S., Mulaosmanovic H., Park M.H., Fichtner S., Lomenzo P.D., Hoffmann M., Schroeder U. Next generation ferroelectric materials for semiconductor process integration and their applications. *Journal of Applied Physics*. 2021; 129(10): 100901. <https://doi.org/10.1063/5.0037617>
7. Мухортов В.М., Юзюк Ю.И. Гетероструктуры на основе наноразмерных сегнетоэлектрических пленок: получение, свойства и применение. Ростов н/Д.: ЮНЦ РАН; 2008. 224 с.
7. Mukhortov V.M., Yuzyuk Yu.I. Heterostructures based on nanosized ferroelectric films: production, properties and application. Rostov on Don: Izd-vo YuNTs RAN; 2022. 224 p. (In Russ.)
8. Pavlenko A.V., Stryukov D.V. Dielectric properties of Ba₂NdFeNb₄O₁₅ at temperatures between 10 K and 320 K. *Ferroelectrics*. 2022; 590(1): 220—226. <https://doi.org/10.1080/00150193.2022.2037974>
9. Munoz R.C., Vidal G., Mulsow M., Lisoni J.G., Arenas C., Concha A., Mora F., Espejo R., Kremer G., Moraga L., Esparza R., Haberle P. Surface roughness and surface–induced resistivity of gold films on mica: Application of quantitative scanning tunneling microscopy. *Physical Review B*. 2000; 62(7): 4686—4697. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.62.4686>
10. Borrás A., Yanguas–Gil A., Barranco A., Cotrino J., González–Elipse A.R. Relationship between scaling behavior and porosity of plasma–deposited TiO₂ thin films. *Physical Review B*. 2007; 76(23): 235303. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.76.235303>
11. Gannepalli A., Yablon D.G., Tsou A.H., Proksch R. Mapping nanoscale elasticity and dissipation using dual frequency contact resonance AFM. *Nanotechnology*. 2011; 22(35): 355705. <http://dx.doi.org/10.1088/0957-4484/22/35/355705>
12. Guo E.J., Roth R., Herklotz A., Hesse D., Dörr K. Ferroelectric 180° domain wall motion controlled by biaxial strain. *Advanced Materials*. 2015; 27(9): 1615—1618. <https://doi.org/10.1002/adma.201405205>
13. Kay H.F., Dunn J.W. Thickness dependence of the nucleation field of triglycine sulphate. *The Philosophical Magazine: A Journal of Theoretical Experimental and Applied Physics*. 1962; 7(84): 2027—2034. <https://doi.org/10.1080/14786436208214471>
14. Jo J.Y., Kim Y.S., Noh T.W., Yoon J.–G., Song T.K. Coercive fields in ultrathin BaTiO₃ capacitors. *Applied Physics Letters*. 2006; 89(23): 232909. <https://doi.org/10.1063/1.2402238>
15. Nishino R., Fujita T.C., Kagawa F., Kawasaki M. Evolution of ferroelectricity in ultrathin PbTiO₃ films as revealed by electric double layer gating. *Scientific Reports*. 2020; 10: 10864. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-67580-8>
16. Signore M.A., Francioso L., De Pascali C., Serra A., Manno D., Rescio G., Quaranta F., Melissano E., Velardi L. Improvement of the piezoelectric response of AlN thin films through the evaluation of the contact surface potential by piezoresponse force microscopy. *Vacuum*. 2023; 218: 112569. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2023.112569>
17. Zhang Z., Li X., Peng Z., Yan X., Liu S., Hong Y., Shan Y., Xu X., Jin L., Liu B., Zhang X., Chai Y., Zhang S., Jen A.K.–Y., Yang Z. Active self–assembly of piezoelectric biomolecular films via synergistic nanoconfinement and in–situ poling. *Nature Communications*. 2023; 14: 4094. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-39692-y>

Информация об авторах / Information about the authors

Павленко Анатолий Владимирович — доктор физ.–мат. наук, ведущий научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук, отдел физики, химии, астрономии, просп. Чехова, д. 41, Ростов–на–Дону, 344006, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8066-4955>; e–mail: Antvpr@mail.ru

Стрюков Даниил Валерьевич — канд. физ.–мат. наук, старший научный сотрудник, отдел физики, химии, астрономии, Федеральный исследовательский центр Южный науч-

Anatoly V. Pavlenko — Dr. Sci. (Phys.–Math.), Leading Researcher, Federal Research Center the Southern Scientific Center, Russian Academy of Sciences, 41 Chekhov Ave., Rostov–on–Don 344006, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8066-4955>; e–mail: Antvpr@mail.ru

Daniil V. Stryukov — Cand. Sci. (Phys.–Math.), Senior Researcher, Federal Research Center the Southern Scientific Center, Russian Academy of Sciences, 41 Chekhov Ave., Ros-

ный центр Российской академии наук, просп. Чехова, д. 41, Ростов-на-Дону, 344006, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5597-3801>; e-mail: strdl@mail.ru

Старухина Софья Сергеевна — лаборант-исследователь, лаборатория физики оксидных сегнетоэлектриков, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Ленинский просп., д. 4, стр. 1, 119049 Москва, Российская Федерация; e-mail: sofya.starukhina@mail.ru

Ильина Татьяна Сергеевна — кандидат физ.-мат. наук, младший научный сотрудник, лаборатория физики оксидных сегнетоэлектриков. Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Ленинский просп., д. 4, стр. 1, 119049 Москва, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1641-1731>; e-mail: ilina.tatina@gmail.com

Киселев Дмитрий Александрович — PhD, кандидат физ.-мат. наук, заведующий лабораторией физики оксидных сегнетоэлектриков, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Ленинский просп., д. 4, стр. 1, 119049 Москва, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1047-3007>; e-mail: dm.kiselev@misis.ru

tov-on-Don 344006, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5597-3801>; e-mail: strdl@mail.ru

Sofia S. Starukhina — Laboratory Assistant Researcher, Laboratory of Physics of Oxide Ferroelectrics, National University of Science and Technology “MISIS”, 4–1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation; e-mail: sofya.starukhina@mail.ru

Tatiana S. Iliina — Cand. Sci. (Phys.–Math.), Junior Researcher, Laboratory of Physics of Oxide Ferroelectrics, National University of Science and Technology “MISIS”, 4–1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1641-1731>; e-mail: ilina.tatina@gmail.com

Dmitry A. Kiselev — Ph.D, Cand. Sci. (Phys.–Math.), Head of the Laboratory of Physics of Oxide Ferroelectrics, National University of Science and Technology “MISIS”, 4–1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1047-3007>; e-mail: dm.kiselev@misis.ru

*Поступила в редакцию 12.06.2024; поступила после доработки 19.07.2024; принята к публикации 29.07.2024
Received 12 June 2024; Revised 19 July 2024; Accepted 29 July 2024*

* * *