

**Наноструктура и сегнетоэлектрические свойства наноразмерных
пленок $BaTiO_3/SrRuO_3/MgO(001)$**

Д.А. Киселев^{1,2}, Д.В. Стрюков³, А.В. Павленко³

¹Фрязинский филиал ФГБУН «Институт радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН»

141190, Россия, Московская область, Фрязино, пл. Введенского, 1

²ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»
119049, Россия, Москва, Ленинский пр., 4, стр. 1

³Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН
344006, Россия, Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41
dm.kiselev@misis.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2025.17.092

Аннотация: В работе методом высокочастотного катодного распыления в атмосфере кислорода были синтезированы высококачественные сегнетоэлектрические гетероструктуры $BaTiO_3/SrRuO_3/MgO(001)$ с толщиной пленки $BaTiO_3$ от 36 до 360 нм. Комплексными методами рентгеноструктурного анализа и сканирующей зондовой микроскопии проведено детальное исследование их кристаллической структуры, морфологии поверхности, пьезоэлектрических и сегнетоэлектрических характеристик. Установлено, что все полученные пленки являются однофазными и гетероэпитаксиальными. Рентгенодифракционные измерения выявили наличие значительной деформации элементарной ячейки, которая достигает максимума (~4,4%) для самых тонких пленок и уменьшается с ростом толщины. Показано, что шероховатость поверхности пленок, оцененная по данным сканирующей зондовой микроскопии, закономерно увеличивается с толщиной, подчиняясь закону масштабирования. Методом силовой микроскопии пьезоотклика продемонстрирована возможность локального переключения поляризации в пленках и обнаружено увеличение величины остаточного пьезоэлектрического отклика с ростом толщины сегнетоэлектрического слоя. Методом Кельвин-зондовой спектроскопии измерен поверхностный потенциал пленок и установлена тенденция к его снижению с увеличением толщины. В работе обсуждаются причины выявленных закономерностей. Полученные результаты важны для понимания размерных эффектов в сегнетоэлектрических наноразмерных пленках и их применения в микроэлектронике и функциональных устройствах.

Ключевые слова: сегнетоэлектрик, $BaTiO_3$, диэлектрические характеристики, сканирующая зондовая микроскопия, поляризация.

Киселев Дмитрий Александрович – к.ф.-м.н., заведующий кафедрой материаловедения полупроводников и диэлектриков, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», старший научный сотрудник Фрязинского филиала ФГБУН «Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН»

Стрюков Даниил Валерьевич – к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник отдела физики, химии, информатики, ФГБУН «Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН»

Павленко Анатолий Владимирович – д.ф.-м.н., заведующий отделом физики, химии, информатики, ФГБУН «Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН»

Original paper

Nanostructure and ferroelectric properties of nanoscale $BaTiO_3/SrRuO_3/MgO(001)$ films

D.A. Kiselev^{1,2}, D.V. Stryukov³, A.V. Pavlenko³

¹Fryazino Branch of V.A. Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS, Fryazino, Russia

²National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russia

³Federal Research Centre The Southern Scientific Centre of the RAS, Rostov-on-Don, Russia

DOI: 10.26456/pcascnn/2025.17.092

Abstract: High-quality ferroelectric $BaTiO_3/SrRuO_3/MgO(001)$ heterostructures with $BaTiO_3$ film

thicknesses ranging from 36 to 360 nm were synthesized using high-frequency cathode sputtering in an oxygen atmosphere. A comprehensive study of their crystal structure, surface morphology, piezoelectric and ferroelectric properties was conducted using X-ray structural analysis and scanning probe microscopy. It was established that all the obtained films are single-phase and heteroepitaxial. X-ray diffraction measurements revealed a significant deformation of the unit cell, which reaches a maximum (~4,4%) for the thinnest films and decreases with increasing thickness. It was shown that the surface roughness of the films, estimated from scanning probe microscopy data, systematically increases with thickness, following a scaling law. Piezoresponse force microscopy demonstrated the possibility of local polarization switching in the films and revealed an increase in the magnitude of the residual piezoelectric response with the growth of the ferroelectric layer thickness. The surface potential of the films was measured by Kelvin probe force spectroscopy, and a tendency for it to decrease with increasing thickness was established. The paper discusses the reasons for the observed patterns. The obtained results are important for understanding size effects in nanoscale ferroelectric films and their applications in microelectronics and functional devices.

Keywords: ferroelectric, BaTiO₃, dielectric characteristics, scanning probe microscopy, polarization.

Dmitry A. Kiselev – Ph. D., Head of the Department of Materials Science of Semiconductors and Dielectrics, National University of Science and Technology «MISIS», Senior Researcher, Fryazino Branch of V.A. Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS, ORCID: 0000-0003-1047-3007

Daniil V. Stryukov – Ph. D., Senior Researcher at the Department of Physics, Chemistry, and Informatics, Federal Research Centre The Southern Scientific Centre of the RAS, ORCID: 0000-0001-5597-3801

Anatoliy V. Pavlenko – Ph. D., Head of the Department of Physics, Chemistry, and Informatics, Federal Research Centre The Southern Scientific Centre of the RAS, ORCID: 0000-0002-4257-2950

Поступила в редакцию/received: 28.06.2025; после рецензирования/reviced: 01.09.2025; принята/accepted 05.09.2025.

1. Введение

Сегнетоэлектрики представляют собой достаточно интересный класс функциональных материалов, отличительной особенностью которых является наличие спонтанной поляризации, сильного отклика на внешние воздействия (электрическое поле или деформация), а также большими величинами диэлектрической проницаемости [1]. В настоящее время для разработки новых компонент микроэлектроники, СВЧ техники и фотоники огромный интерес вызывают тонкие пленки сегнетоэлектриков. Основные преимущества тонких пленок заключаются в малых размерах и весе, высокой рабочей частоте, возможности изготовления интегрированных многослойных структур, хорошей температурной стабильности характеристик, а также работе на более низких напряжениях в сравнении с керамическими и монокристаллическими материалами. Существуют огромные потенциальные области применения сегнетоэлектрических и пьезоэлектрических пленок, такие как элементы памяти, гибкие наногенераторы, портативные микроэлектронные устройства, аккумуляторы энергии, пьезоэлектрические и пироэлектрические датчики и т.д. [2]. Важнейшая особенность тонких пленок заключается в наличии деформации элементарной ячейки, которая может оказывать сильное воздействие на свойства материала [3].

Для понимания проявляющихся в тонких пленках размерных

эффектов важно, чтобы рассматриваемый материал был тщательно изучен в виде монокристаллов и керамик, в связи с чем классические сегнетоэлектрики, такие как титанат бария ($BaTiO_3$, *BTO*), в настоящее время снова стали крайне актуальными. Среди сегнетоэлектриков титанат бария в виде керамики и монокристаллов является одним из самых изученных сегнетоэлектриков как с практической точки зрения, так и в теоретических исследованиях [4, 5], где он зачастую использовался как модельный объект.

BTO является классическим сегнетоэлектриком со структурой перовскита с общей химической формулой ABO_3 , где катионы Ba^{2+} занимают *A* позиции в вершинах куба, катионы Ti^{4+} занимают *B* позиции в центре куба, а анионы O^{2-} занимают центры граней образуя октаэдр TiO_6 . При температуре выше температуры Кюри ($T_c = 120^\circ C$) *BTO* имеет кубическую симметрию (*Pm3m*), а ниже температуры Кюри *BTO* переходит в сегнетоэлектрическую тетрагональную фазу (*P4mm*). При дальнейшем уменьшении температуры *BTO* имеет еще два структурных фазовых переходов в орторомбическую (*Bmm2* при $5^\circ C$) и ромбоэдрическую (*R3m* при $-90^\circ C$). При комнатной температуре *BTO* имеет тетрагональную симметрию с поляризацией, направленной вдоль оси *c*. С практической точки зрения интерес к титанату бария обусловлен высокими значениями диэлектрической проницаемости и электрооптического коэффициента, низкими оптическими потерями [4, 6]. А отсутствие редких и токсичных элементов в его структуре показывает его актуальность для промышленного применения.

Тонкие пленки титаната бария уже были успешно получены различными напылительными методиками (молекулярно-лучевая эпитаксия, импульсное лазерное напыление, золь-гель, ВЧ напыление, химическое осаждение из газовой фазы [7-10]), однако свойства получаемых пленок сильно зависели от выбранной технологии получения, условий при которых производилось напыление и выбора подложки. Одним из методов, который позволяет получить пленки кислород-содержащих материалов, является метод высоко-частотного катодного распыления, в рамках которого в качестве мишени для распыления используется керамика требуемого состава, а специфика метода позволяет сохранить состав пленок [11, 12].

В данной работе получены высококачественные тонкие пленки $BaTiO_3$ различной толщины на монокристаллических пластинах MgO , покрытых тонким проводящим слоем $SrRuO_3$. Исследованы их кристаллическая структура, топография поверхности и сегнетоэлектрические свойства полученных тонких пленок.

2. Экспериментальная часть

Для получения тонких пленок $BTO/SRO/MgO(001)$ использовался метод ВЧ катодного распыления в атмосфере кислорода, а в качестве подложки использовалась подготовленная под гетероэпитаксиальное осаждение монокристаллическая пластина MgO среза (001) (OST Photonics, China, полировка – двухсторонняя, толщиной – 500 мкм). Напыление производилось в два этапа, когда на первом этапе на подложку напылялся тонкий слой $SrRuO_3$ в течении 3 мин. После охлаждения до комнатной температуры, на втором этапе напылялся основной слой $BaTiO_3$, толщина которого контролировалась по времени напыления. В качестве мишеней для распыления использовались однофазные и беспримесные керамические диски $BaTiO_3$ и $SrRuO_3$ диаметром 50 мм, толщиной 3 мм и относительной плотностью не менее 91%. Температура подложки в начале напыления каждого слоя $\sim 400^\circ\text{C}$, давление чистого кислорода в камере $\sim 0,5-0,6$ Торр, расстояние между мишенью и печью – 12 мм. Таким образом были получены пленки $BTO/SRO/MgO(001)$ с толщиной слоя BTO равное: 36, 60, 96, 156 и 360 нм.

Рентгendifракционные исследования образцов при комнатной температуре проводились на многофункциональном рентгеновском комплексе «РИКОР» (геометрия Брэгга-Брентано, гониометр с шагом до $0,001^\circ$ (Crystal Logic Inc.), рентгеновская трубка БСВ21-Cu (АО «Светлана-Рентген»), сцинтилляционный детектор (ООО ИТЦ «Радикон»)).

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 2.67).

3. Результаты и обсуждение

Кристаллическая структура полученной серии тонких пленок $BTO/SRO/MgO(001)$ была исследована методом дифракции рентгеновских лучей. На $\theta-2\theta$ рентгенограммах всех исследованных пленок были обнаружены только отражения от семейства плоскостей (001) относящиеся к пленке BTO и подложке MgO (см. рис. 1 а). Для доказательства эпитаксиального роста были получены φ -рентгенограммы рефлексов (101) пленки BTO и (202) подложки MgO (см. рис. 1 б).

Не зависимо от толщины пленок BTO на φ -рентгенограммах присутствовали по 4 отражения, угловые положения которых совпадали с положениями отражений рефлексов (202) подложки MgO . Это доказывает,

что при росте пленок *BTO* на подложке *SRO/MgO* (001), не зависимо от их толщины, элементарные ячейки пленок ориентируются полностью параллельно элементарной ячейке подложки.

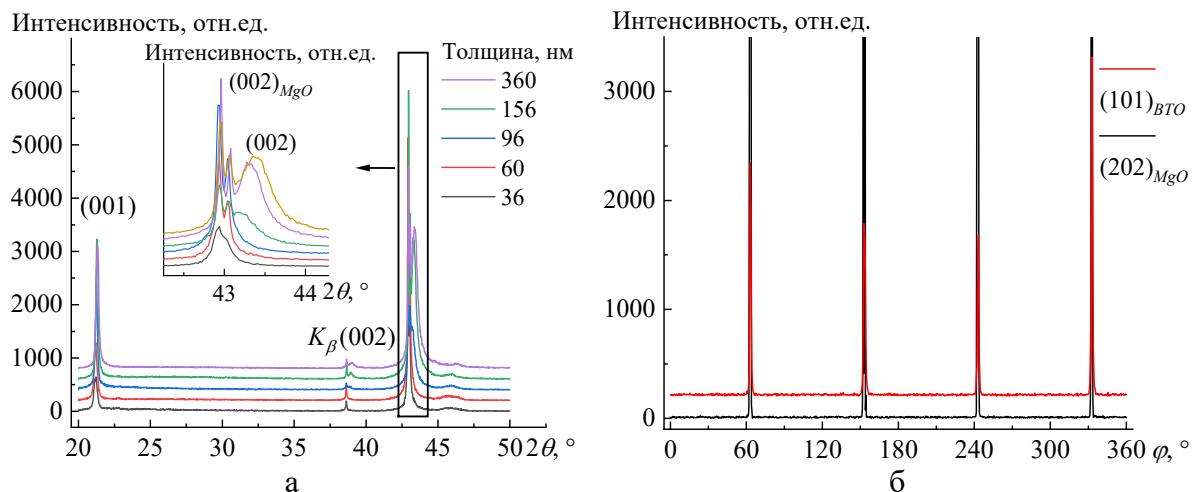


Рис. 1. $\theta-2\theta$ рентгенограммы для серии тонких пленок *BTO/SRO/MgO* (001) различной толщины (а), φ рентгенограммы рефлекса (101) пленки *BTO* и (202) подложки *MgO* (б).

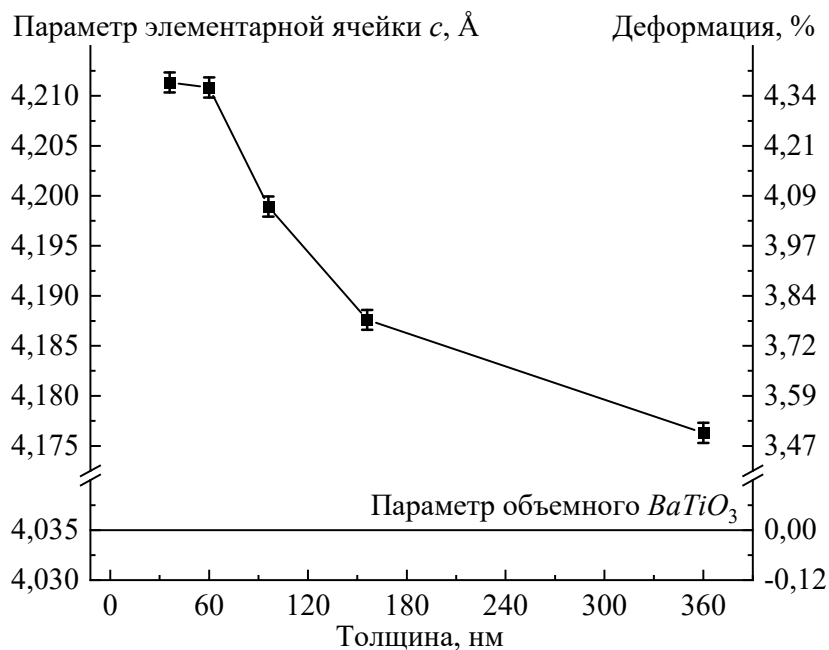


Рис. 2. Параметры элементарной ячейки «*c*» и деформация относительно параметров объемного материала для серии тонких пленок *BTO/SRO/MgO* (001) различной толщины.

При анализе $\theta-2\theta$ рентгенограмм можно заметить, что с уменьшением толщины пленки угловые положения их максимумов смещаются в область меньших углов. А для самой тонкой пленки (вставка на рис 1 а) рефлекс (002) от пленки полностью перекрывается подложкой, поэтому для их анализа производилось разложение на компоненты и

учитывался вклад от подложки. Для определения параметра «с» всей серии тонких пленок учитывались 4 порядка отражения рефлексов (001), что позволило их определить с точностью до $0,001\text{\AA}$. Полученные величины параметров элементарной ячейки «с» в зависимости от толщины пленок представлены на рис. 2. Сравнивая полученные параметры пленок с параметром объемного BaTiO_3 ($a=3,991\text{\AA}$, $c=4,035\text{\AA}$ [13]) можно заметить, что наибольшую деформацию имеет самая тонкая пленка, в которой деформация достигает $\sim 4,4\%$. Также можно заметить, что в случае самой тонкой пленки, ее параметр «с» сравнивается с параметром подложки MgO .

На рис. 3 представлены изображения поверхности пленок BTO с толщинами 36 и 360 нм. Установлено, что среднеквадратичная шероховатость поверхности увеличивается с 1,1 нм для пленки BTO (36 нм) до 35 нм для пленки толщиной 360 нм.

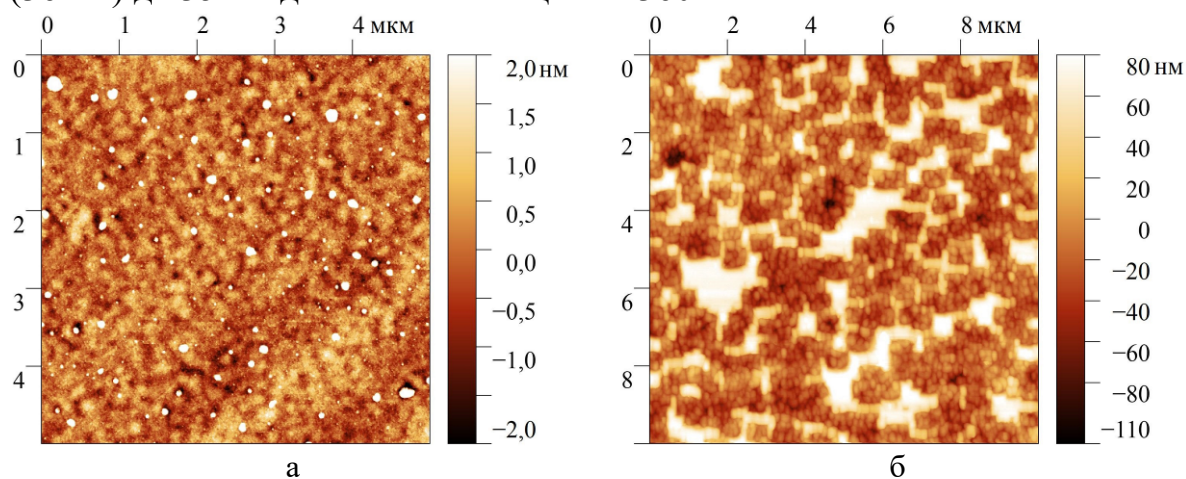


Рис. 3. Морфология поверхности пленок BTO с толщинами 36 нм (а), 360 нм (б).

На рис. 4 представлен эффект локальной реполяризации пленки BTO постоянным напряжением. Индуцированные домены создавались путем сканирования поверхности пленки постоянным напряжением, подаваемого на проводящий кантилевер, который играл роль верхнего электрода. Таким образом получались две заполяризованные области: левый прямоугольник (светлый контраст) поляризация напряжением $+25\text{ В}$ и правый (темный контраст) – поляризация напряжением -25 В , соответственно.

Для анализа полученных экспериментальных данных предложена следующая методика расчета величины индуцированного пьезоэлектрического отклика. На рис. 4 а показан профиль сигнала пьезоэлектрического отклика, проведенный посередине скана, вставка на рис. 4. Величину остаточного индуцированного пьезоэлектрического отклика (ΔP) мы определяли по высоте «ступени» между положительной и

отрицательной поляризованными областями. Для данного образца это значение составило ~ 80 пА.

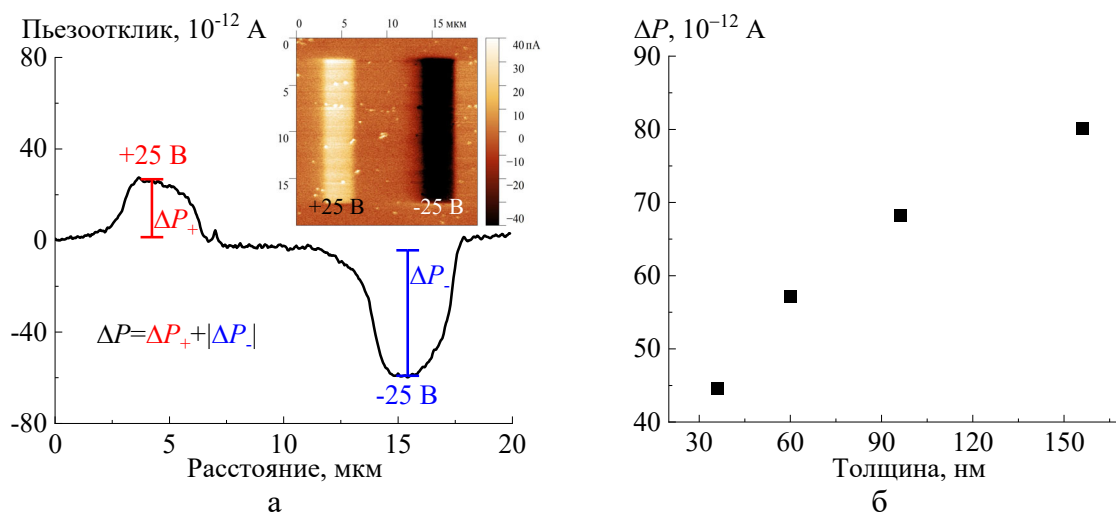


Рис. 4. Профиль сигнала пьезоотклика после поляризации напряжением ± 25 В для пленки ВТО (толщина 156 нм) (а). «Остаточная» поляризация (ΔP) рассчитывалась как сумма величины пьезоотклика для положительно поляризованной области (ΔP_+) и отрицательной (ΔP_-) (по модулю). На вставке – скан после поляризации. График зависимости «остаточной» поляризации (пьезоотклика) от толщины пленок ВТО (б).

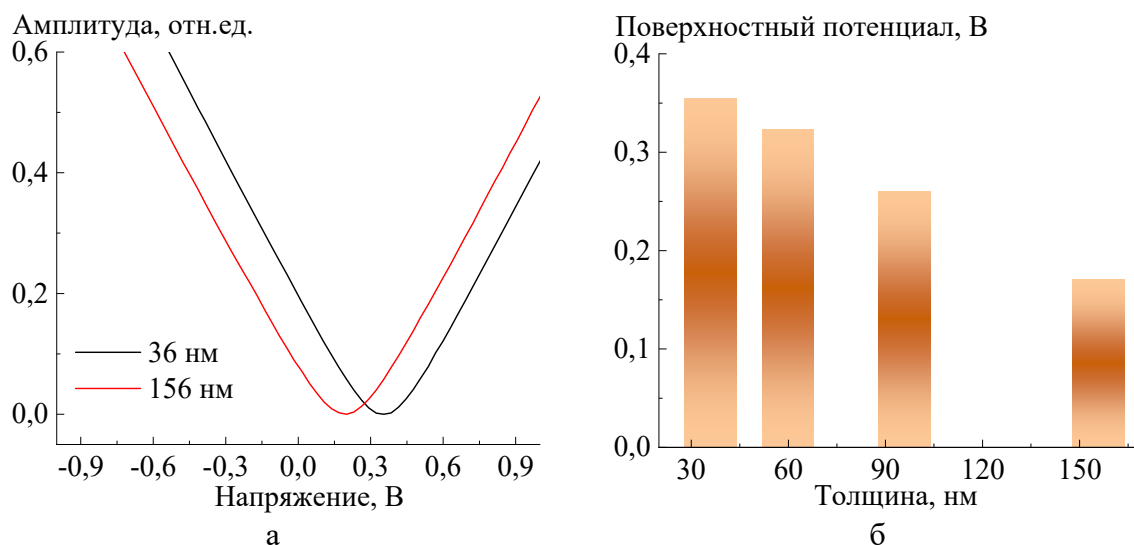


Рис. 5. Кривые амплитуды колебаний зонда в режиме Кельвин моды от величины напряжения смещения для пленок ВТО толщиной 36 нм и 156 нм (а), зависимость значений поверхностного потенциала для пленок титаната бария различной толщины (б).

Таким образом данная процедура (поляризация и дальнейший расчет величины ΔP) выполнена для всех исследуемых образцов. На рис. 4 б показана зависимость сигнала остаточного пьезоотклика ΔP для пленок ВТО различной толщин. Стоит заметить, что с увеличением толщины пленки интенсивность сигнала пьезоотклика возрастает.

Для определения величины поверхностного потенциала пленок титаната бария применялась следующая методика: в режиме Кельвин зондовой микроскопии в режиме спектроскопии линейно изменялось напряжение смещение от -3 В до $+3$ В, и в случае совпадения напряжения смещения с потенциалом поверхности на кривой будет наблюдаться минимальный сигнал амплитуды колебаний зонда для второго прохода $Mag1(BV)$ (см. рис. 5 а).

Таким образом определены значения поверхностного потенциала для всех исследуемых пленок. Из представленного графика на рис. 5 б видно, что с увеличением толщины сегнетоэлектрической пленки уменьшается значение поверхностного потенциала.

4. Заключение

В результате проведенного исследования методом высокочастотного катодного распыления в кислородной атмосфере была успешно реализована технология синтеза гетероструктур $BaTiO_3 / SrRuO_3 / MgO(001)$ с варьируемой толщиной сегнетоэлектрического слоя от 36 до 360 нм. Комплексный анализ полученных образцов позволил установить фундаментальные взаимосвязи между технологическими параметрами, структурным состоянием и функциональными свойствами наноразмерных пленок титаната бария.

Ключевым результатом работы является доказательство гетероэпитаксиального роста пленок $BaTiO_3$ с ориентацией кристаллографического направления $[001]$ по нормали к поверхности подложки. Эпитаксиальный характер роста был подтвержден методом рентгеноструктурного анализа, показавшим полное совпадение азимутальной ориентации элементарных ячеек пленки и подложки. Установлено, что пленки находятся в состоянии значительной деформации, величина которой максимальна для наименьшей толщины ($\sim 4,4\%$) и монотонно уменьшается с ее увеличением. Данный факт объясняется релаксацией упругих напряжений по мере роста пленки и приближением параметров ее решетки к объемным значениям.

Исследование морфологии поверхности методами сканирующей зондовой микроскопии выявило четкую корреляцию между толщиной пленки и шероховатостью поверхности, которая возрастала с 1,1 нм до 35 нм. Полученная зависимость демонстрирует поведение, подчиняющееся закону масштабирования, что указывает на специфические механизмы роста, характерные для используемой технологии осаждения.

Исследование сегнетоэлектрических свойств методом силовой микроскопии пьезоотклика подтвердило наличие остаточной поляризации и возможность ее локального переключения внешним электрическим

полем. Показано, что величина индуцированного пьезоэлектрического отклика (ΔP) возрастает с увеличением толщины пленки, что связано с уменьшением влияния дефектов и деформации, а также с развитой доменной структурой в более толстых образцах. Параллельно, методом Кельвин-зондовой спектроскопии установлено, что поверхностный потенциал пленок, напротив, снижается с ростом толщины. Это может быть обусловлено уменьшением вклада поверхностных дефектов и деформаций, играющих ключевую роль в формировании поверхностного заряда в ультратонких пленках.

Таким образом, в работе не только продемонстрирована эффективность метода ВЧ-распыления для получения высококачественных текстурных пленок $BaTiO_3$, но и детально охарактеризованы критически важные размерные эффекты, существенно влияющие на их функциональные свойства. Полученные результаты вносят значительный вклад в понимание физики сегнетоэлектрических состояний в наноразмерных объектах и имеют важное прикладное значение для разработки перспективных элементов микро- и наноэлектроники, таких как энергонезависимая память, датчики и актуаторы.

Работа выполнена в рамках реализации государственного задания ЮНЦ РАН, № гр. проекта 125011400232-3 с использованием приборной базы ЦКП ЮНЦ РАН № 501994 (<https://ckp-rf.ru/catalog/ckp/501994/>). Исследования методами сканирующей зондовой микроскопии выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания (проект № FSME-2024-0001), а также в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

Библиографический список:

1. Physics of ferroelectrics: a modern perspective / ed. by K. M. Rabe, C. H. Ahn, J.-M. Triscone. – Berlin: Springer, 2007. – XII+388 p. DOI: 10.1007/978-3-540-34591-6.
2. **Setter, N.** Ferroelectric thin films: review of materials, properties, and applications / N. Setter, D. Damjanovic, L. Eng et al. // Journal of Applied Physics. – 2006. – V. 100. – I. 5. – P. 051606-1-051606-46. DOI: 10.1063/1.2336999.
3. **Janolin, P.-E.** Strain on ferroelectric thin films / P.-E. Janolin // Journal of Materials Science. – 2009. – V. 44. – I. 19. – P. 5025-5048. DOI: 10.1007/s10853-009-3553-1.
4. **Karvounis, A.** Barium titanate nanostructures and thin films for photonics / A. Karvounis, F. Timpu, V.V. Vogler-Neuling, R. Savo, R. Grange // Advanced Optical Materials. – 2020. – V. 8. – I. 20. – Art. № 2001249. – 23 p. DOI: 10.1002/adom.202001249.
5. **Acosta, M.** $BaTiO_3$ -based piezoelectrics: Fundamentals, current status, and perspectives / M. Acosta, N. Novak, V. Rojas et al. // Applied Physics Reviews. – 2017. – V. 4. – I. 4. – P. 041305-1-041305-53. DOI: 10.1063/1.4990046.
6. **Everhardt, A.S.** Temperature-independent giant dielectric response in transitional $BaTiO_3$ thin films / A.S. Everhardt, T. Denneulin, A. Grünebohm et al. // Applied Physics Reviews. – 2020. – V. 7. – I. 1. – P. 011402-1-011402-8. DOI: 10.1063/1.5122954.
7. **Shin, Y.J.** Low temperature growth of epitaxial ferroelectric $BaTiO_3$ / Y.J. Shin, J. Jiang, Y. Jia, F.J. Walker, C. H. Ahn // APL Materials. – 2021. – V. 9. – I. 4. – P. 041104-1-041104-6. DOI: 10.1063/5.0046624.
8. **Komatsu, K.** In-plane ferroelectricity and enhanced Curie temperature in perovskite $BaTiO_3$ epitaxial thin films / K. Komatsu, I. Suzuki, T. Aoki et al. // Applied Physics Letters. – 2020. – V. 117. – I. 7. – Art. № 072902. – 5 p. DOI: 10.1063/5.0013484.

9. Reddy, Y.K.V. Structural and optical properties of BaTiO₃ thin films prepared by radio-frequency magnetron sputtering at various substrate temperatures / Y.K.V. Reddy, D. Mergel, S. Reuter, V. Buck, M. Sulkowski // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 2006. – V. 39. – I. 6. – P. 1161-1168. DOI: 10.1088/0022-3727/39/6/023.
10. Sharma, H.B.K. Ferroelectric and dielectric properties of sol-gel processed barium titanate ceramics and thin films / H.B.K. Sharma, H.N.K. Sarma, A. Mansingh // *Journal of Materials Science*. – 1999. – V. 34. – I. 6. – P. 1385-1390. DOI: 10.1023/A:1004578905297.
11. Мухортов, В.М. Гетероструктуры на основе наноразмерных сегнетоэлектрических пленок: получение, свойства и применение / В.М. Мухортов, Ю.И. Юзюк. – Ростов н/Д: Изд-во ЮНЦ РАН, 2008. – 224 с.
12. Павленко, А.В. Наноразмерные пленки ниобата бария-стронция: особенности получения в плазме высокочастотного разряда, структура и физические свойства / А.В. Павленко, С.П. Зинченко, Д.В. Стрюков, А.П. Ковтун. – Ростов-на-Дону: ЮНЦ РАН, 2022. – 242 с.
13. Kwei, G.H. Structures of the ferroelectric phases of barium titanate / G.H. Kwei, A.C. Lawson, S.J.L. Billinge, S.-W. Cheong // *The Journal of Physical Chemistry*. – 1993. – V. 97. – I. 10. – P. 2368-2377. DOI: 10.1021/j100112a043.

References:

1. *Physics of ferroelectrics: a modern perspective*, ed. by K.M. Rabe, C.H. Ahn, J.-M. Triscone. Berlin, Springer, 2007, XII+388 p. DOI: 10.1007/978-3-540-34591-6.
2. Setter N., Damjanovic D., Eng L. et al. Ferroelectric thin films: review of materials, properties, and applications, *Journal of Applied Physics*, 2006, vol. 100, issue 5, pp. 051606-1-051606-46. DOI: 10.1063/1.2336999.
3. Janolin P.-E. Strain on ferroelectric thin films, *Journal of Materials Science*, 2009, vol. 44, issue 19, pp. 5025-5048. DOI: 10.1007/s10853-009-3553-1.
4. Karvounis A., Timpu F., Vogler-Neuling V.V., Savo R., Grange R. Barium titanate nanostructures and thin films for photonics, *Advanced Optical Materials*, 2020, vol. 8, issue 20, art. no. 2001249, 23 p. DOI: 10.1002/adom.202001249.
5. Acosta M., Novak N., Rojas V. et al. BaTiO₃-based piezoelectrics: Fundamentals, current status, and perspectives, *Applied Physics Reviews*, 2017, vol. 4, issue 4, pp. 041305-1-041305-53. DOI: 10.1063/1.4990046.
6. Everhardt A.S., Denneulin T., Grünebohm A. et al. Temperature-independent giant dielectric response in transitional BaTiO₃ thin films, *Applied Physics Reviews*, 2020, vol. 7, issue 1, pp. 011402-1-011402-8. DOI: 10.1063/1.5122954.
7. Shin Y.J., Jiang J., Jia Y., Walker F.J., Ahn C.H. Low temperature growth of epitaxial ferroelectric BaTiO₃, *APL Materials*, 2021, vol. 9, issue 4, pp. 041104-1-041104-6. DOI: 10.1063/5.0046624.
8. Komatsu K., Suzuki I., Aoki T. et al. In-plane ferroelectricity and enhanced Curie temperature in perovskite BaTiO₃ epitaxial thin films, *Applied Physics Letters*, 2020, vol. 117, issue 7, art. no. 072902, 5 p. DOI: 10.1063/5.0013484.
9. Reddy Y.K.V., Mergel D., Reuter S., Buck V., Sulkowski M. Structural and optical properties of BaTiO₃ thin films prepared by radio-frequency magnetron sputtering at various substrate temperatures, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2006, vol. 39, issue 6, pp. 1161-1168. DOI: 10.1088/0022-3727/39/6/023.
10. Sharma H.B.K., Sarma H.N.K., Mansingh A. Ferroelectric and dielectric properties of sol-gel processed barium titanate ceramics and thin films, *Journal of Materials Science*, 1999, vol. 34, issue 6, pp. 1385-1390. DOI: 10.1023/A:1004578905297.
11. Mukhortov V.M., Yuzuk Y.I. *Geterostruktury na osnove nanorazmernykh segnetoelektricheskikh plenok: poluchenie, svojstva i primenenie* [Heterostructures based on nanoscale ferroelectric films: production, properties and application]. Rostov-on-Don, SSC RAS Publishing, 2008, 224 p. (In Russian).
12. Pavlenko A.V., Zinchenko S.P., Stryukov D.V., Kovtun A.P. *Nanorazmernye plenki niobata bariya-strontsiya: osobennosti polucheniya v plazme vysokochastotnogo razryada, struktura i fizicheskie svojstva* [Nanoscale barium strontium niobate films: features of production in hf discharge plasma, structure and physical properties], Rostov-on-Don, SSC RAS Publishing, 2022, 244 p. (In Russian).
13. Kwei G.H., Lawson A.C., Billinge S.J.L., Cheong S.-W. Structures of the ferroelectric phases of barium titanate, *The Journal of Physical Chemistry*, 1993, vol. 97, issue 10, pp. 2368-2377. DOI: 10.1021/j100112a043.