

**Министерство науки и высшего образования  
Российской Федерации**  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«ЧЕЧЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«КАБАРДИНО-БАЛКАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
им. Х.М. БЕРБЕКОВА»  
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ И МАТЕМАТИКИ**

Государственное казенное научное учреждение  
**«АКАДЕМИЯ НАУК ЧЕЧЕНСКОЙ РЕСПУБЛИКИ»**



**«СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ДИАГНОСТИКИ  
ПОВЕРХНОСТИ»**

*Материалы Международной научно-практической конференции*

*г. Грозный 19 мая 2021 г.*

**Грозный – 2021 г.**

**УДК 538.9**  
**ББК 94+22.3**

**Ответственный редактор:**

**Кутуев Р.А.**, к.ф.-м.н., доцент, проректор по общим вопросам ФГБОУ ВО «Чеченского государственного университета»

**Редакционная коллегия:**

Дадашев Р. Х., д.ф.-м.н.,  
Алчагиров Б. Б., д.ф.-м.н.,  
Горбенко Е. Е., д.ф.-м.н.,  
Умхаева З. С., д.ф.-м.н.,  
Хоконов М. Х., д.ф.-м.н.,  
Мальшевский В. С., д.ф.-м.н.,  
Хаджимурадов М. А., д.ф.-м.н.,

Элимханов Дж. З., к.ф.-м.н.,  
Хасанов А. И., к.ф.-м.н.,  
Хасбулатов С. В., к.ф.-м.н.,  
Алихаджиев С. Х., к.ф.-м.н.,  
Алиев И. М., к.ф.-м.н.,

Современные методы исследования и диагностики поверхности. Материалы Международной научно-практической конференции (Грозный, 19 мая 2021 г.). – Грозный: издательство ФГБОУ ВО «Чеченский государственный университет». 2021. – 138 с.

*В настоящем сборнике представлены материалы международной научно-практической конференции «Современные методы исследования и диагностики поверхности», состоявшейся 19 мая 2021 г. в г. Грозный.*

*Программа конференции включала работу секций «Физика конденсированного состояния», «Физическая электроника», «Теплофизика и теоретическая теплотехника». Статьи посвящены основным проблемам и перспективам развития информационных технологий, а также результатам научных исследований участников конференции.*

*Сборник предназначен для широкого круга читателей, интересующихся научными исследованиями и методиками, научных работников, преподавателей, аспирантов, магистрантов и студентов с целью использования в научной работе. Статьи представлены в авторской редакции. Ответственность за аутентичность и точность цитат, имен, названий и иных сведений, а также за соблюдение законов об интеллектуальной собственности несут авторы публикуемых материалов.*

**ISSN 978-5-91127-298-2**

© Авторы, 2021 г.

© Чеченский государственный университет», 2021 г.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Умхаева З.С., Илюшин А.С., Алероева Т.А., Терешина И.С., Панкратов Н.Ю.</b> Исследование ас-восприимчивости сплавов системы Sm(Tby)Fe <sub>2</sub> в области температуры магнитного фазового перехода.....	5
<b>Алчагиров Б.Б., Хибиев А.Х., Канаметова О.Х., Дышекова Ф.Ф., Коков З.А.</b> К определению поверхностного натяжения жидких металлов методом большой лежащей капли: влияние механических колебаний на результаты измерений.....	12
<b>Горбенко Е.Е., Пилипенко Е.А.</b> Влияние трехчастичного взаимодействия на фононные частоты кристаллического криптона в модели деформируемых атомов.....	18
<b>Хоконов М.Х., Бекулова И.З., Ломаносов В.С.</b> Излучение ультрарелятивистских электронов и позитронов при каналировании в кристаллах и полях мощных лазеров.....	26
<b>Кара-Мурза С.В., Корчинова Н.В., Техтелев Ю.В., Жидель К.М., Павленко А.В.</b> Эллипсометрия тонких пленок ниобатов бария-стронция.....	36
<b>Павленко А.В., Зинченко С.П. Ковтун А.П., Толмачев Г.Н., Киселева Л.И., Стрюков Д.В., Матяш Я.Ю.</b> Особенности сегнетоэлектрического состояния в поликристаллических тонких пленках Ва0.5SR0.5NB2O6 на подложке (001) Si.....	43
<b>Матиев А.Х., Успажиев Р.Т.</b> Фазовые переходы в кристаллы TlGaSe <sub>2</sub> .....	48
<b>Сайпулаева Л.А., Мельникова Н.В., Тебеньков А.В., Бабушкин А.Н., Риль А.И., Маренкин С.Ф., Захвалинский В.С.</b> Отрицательное магнитосопротивление в CdAs <sub>2</sub> при высоком давлении.....	50
<b>Андрюшин К.П., Смотрakov В.Г., Андрюшина И.Н., Еремкин В.В., Резниченко Л.А.</b> Теплофизические свойства высокотемпературных и анизотропных материалов с участием РВТЮЗ.....	56
<b>Хасбулатов С.В., Андрюшин К.П., Омаров З.Х., Резниченко Л.А.</b> Диагностика теплофизических свойств мультиферроика феррита висмута, модифицированного редкоземельными элементами.....	60
<b>Мустафаев Г.А., Мустафаев А.Г., Хасанов А.И., Черкесова Н.В., Мустафаев А.Г.</b> Влияние характеристик отмывочных жидкостей на степень очистки кремниевых пластин.....	65
<b>Мустафаев Г.А., Мустафаев А.Г., Хасанов А.И., Черкесова Н.В., Мустафаев А.Г.</b> Формирование малоразмерных контактов на основе слоя вольфрама.....	70
<b>Шомахов З.В., Налимова С.С.</b> Исследование состава поверхности легированных наностержней оксида цинка.....	75
<b>Джамбулатов Р.С.</b> Экспериментальные исследования свойств поверхности в системе вода-ацетон-диоксан и боковых двойных системах.....	80
<b>Калмыков Р.М., Кармоков А.М., Лысенко А.Г., Хасанов А.И.</b> Электронно-микроскопические исследования матрицы PbTe с примесями CdSe.....	85
<b>Дышекова А.Х., Кармоков А.М., Хасанов А.И.</b> Состав и структура поверхности раздела монокристалла хлорида натрия и свинца.....	90
<b>Афшагов А.А., Шебзухова М.А., Бжихатлов К.Ч.</b> Поверхностное натяжение в двухкомпонентных металлических системах.....	95
<b>Малкондуев Ю.А., Кокоева А.А.</b> Сополимеры на основе N-винилпирролидона и галогенсодержащих соединений акриловых кислот.....	99

<b>Мараева Е.В., Халугарова К., Мошников В.А.</b> Композитные антибактериальные структуры на основе гидроксиапатита и оксида цинка.....	<b>104</b>
<b>Калажоков З.Х., Гогия А.Р., Калажоков Х.Х., Зигалов А.Х., Мамиков Р.З.</b> Оценка толщины поверхностного адсорбционного слоя бинарных сплавов щелочных металлов.....	<b>110</b>
<b>Калажоков З.Х., Гогия А.Р., Калажоков Х.Х., Жамбеков А.Х.</b> Оценка толщины поверхностного адсорбционного слоя $\delta_0$ по данным РФЭС измерений.....	<b>113</b>
<b>Кузамишев А.Г., Шебзухова М.А., Бжихатлов К.Ч.</b> Размерная зависимость теплоты плавления наночастиц сферической формы на границе твердое-жидкость.....	<b>116</b>
<b>Смирнов М.В., Сидоров Н.В., Палатников М.Н., Пикулев В.Б.</b> Люминесценция с поверхности номинально чистых кристаллов ниобата лития разного генезиса.....	<b>120</b>
<b>Джангаров А.И., Гишлакаев С.У.</b> Цифровые технологии для мониторинга сельскохозяйственного процесса.....	<b>126</b>
<b>Себаева З.Ш.</b> Современные инновационные технологии преподавания курса физики в области образования.....	<b>130</b>

УДК 539-2 DOI: 10.36684/42-2021-1-36-42

## ЭЛЛИПСОМЕТРИЯ ТОНКИХ ПЛЕНОК НИОБАТОВ БАРИЯ-СТРОНЦИЯ

**С.В. Кара-Мурза,**

*кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики и методики преподавания физики Института физико-математического образования, информационных и обслуживающих технологий Луганского государственного педагогического университета, г. Луганск*  
*skaramurza@gmail.com*

**Н.В. Корчикова,**

*старший преподаватель кафедры физики и методики преподавания физики Института физико-математического образования, информационных и обслуживающих технологий Луганского государственного педагогического университета, г. Луганск*  
*korchikova55@gmail.com*

**А.Г. Сильчева,**

*кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой физики и методики преподавания физики Института физико-математического образования, информационных и обслуживающих технологий Луганского государственного педагогического университета, г. Луганск*  
*annasilcheva@list.ru*

**Ю.В. Тхтелев,**

*заведующий лабораторией спецфизпрактикума кафедры физики и методики преподавания физики Института физико-математического образования, информационных и обслуживающих технологий Луганского государственного педагогического университета, г. Луганск*  
 *аспирант ГУ «Донецкого физико-технического института имени А.А. Галкина», г. Донецк*  
*tehtelev@gmail.com*

**К.М. Жидель,**

*Ростов-на-Дону, Научно-исследовательский институт физики Южного федерального университета, г. Ростов-на-Дону*  
*karinagidel@mail.ru*

**А.В. Павленко,**

*Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук, г. Ростов-на-Дону, Научно-исследовательский институт физики Южного федерального университета, г. Ростов-на-Дону*  
*antvpr@mail.ru*

**Аннотация.** Представлены результаты эллипсометрических измерений оптических параметров наноразмерных сегнетоэлектрических пленок ниобатов бария-стронция  $Sr_{0,5}Ba_{0,5}Nb_2O_6$  (SBN-50) /  $Al_2O_3$  (0001) и  $Sr_{0,61}Ba_{0,39}Nb_2O_6$  (SBN-61) /  $MgO$  (001) разной толщины. Установлено, что все пленки эпитаксиальные с направлением роста, параллельным полярной оси с кристалла. Определены показатели преломления, толщины базового и нарушенного слоев каждой из пленок, установлены закономерности свойств пленок в зависимости от их толщины.

**Ключевые слова:** тонкие пленки, оптические параметры, эллипсометрия, нарушенный слой.

## ELLIPSOMETRY OF BARIUM-STRONTIUM NIOBATE THIN FILMS

**S.V. Kara-Murza,**

*PhD in Physics and Mathematics, docent of the Department of Physics and Methods of teaching Physics of the Institute of Physics and Mathematics Education, Information and Service Technologies of the Lugansk State Pedagogical University, Lugansk*

**N.V. Korchikova,**

*Senior Lecturer of the Department of Physics and Methods of teaching Physics of the Institute of Physics and Mathematics Education, Information and Service Technologies of the Lugansk State Pedagogical University, Lugansk*

**A.G. Silcheva,**

*PhD in Physics and Mathematics, docent, Head of the Department of Physics and Methods of teaching Physics of the Institute of Physics and Mathematics Education, Information and Service Technologies of the Lugansk State Pedagogical University, Lugansk*

**Y.V. Tehtev,**

*Head of the Laboratory of the Special Physics Practicum of the Department of Physics and Methods of teaching Physics of the Institute of Physics and Mathematics Education, Information and Service Technologies of Lugansk State Pedagogical University, Lugansk  
postgraduate student of the State Institution «Donetsk Institute of Physics and Technology named after A.A. Galkin», Donetsk*

**K.M. Zhidel,**

*Research Institute of Physics, Southern Federal University, Rostov-on-Don*

**A.V. Pavlenko,**

*Research Institute of Physics, Southern Federal University, Rostov-on-Don  
Federal Research Center The Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences*

**Abstract.** *The ellipsometric results of the optical parameters of  $Sr_{0,5}Ba_{0,5}Nb_2O_6$  (SBN-50) /  $Al_2O_3$  (0001) and  $Sr_{0,61}Ba_{0,39}Nb_2O_6$  (SBN-61) /  $MgO$  (001) nanosized ferroelectric barium-strontium niobate films with various thicknesses are presented. It was found that all films are epitaxial with the growth direction parallel to the crystal polar  $c$  axis. The refractive index, the thickness of the base and damaged layers of each films are determined, the regularities of the films properties are established depending on their thickness.*

**Keywords:** *thin films, optical parameters, ellipsometry, damaged layer.*

**Введение.** Стремительное развитие микро- и нанoeлектроники привело к возрастающей роли планарных технологий в современном материаловедении. Так, возрос интерес и к вопросам получения и исследования свойств тонкослойных гетероструктур на основе сегнетоэлектрических материалов [1], в частности ниобатов бария-стронция  $Sr_{1-x}Ba_xNb_2O_6$ . Очевидно, что свойствами пленок можно управлять не только изменением состава твердого раствора, но и технологией получения, выбором кристаллографической ориентации и/или типом подложек. В литературе такого направления исследования пленок представлены недостаточно. В работах [3,6-7] показано, что пленки  $Sr_{0,5}Ba_{0,5}Nb_2O_6$  (SBN-50) толщиной 300 nm, нанесенные на кристаллические подложки  $Al_2O_3$  (0001) и Pt(111)/Si(001), характеризуются общими свойствами: являются поликристаллическими текстурированными, примесные фазы отсутствуют, пленки формируются с преимущественной ориентацией в направлении кристаллографической оси [001], параллельной нормали к подложке, оптические параметры пленок и кристаллов не отличаются. При этом вызывает интерес исследования оптических свойств SBN-пленок в зависимости от их толщины.

В настоящей работе представлены результаты эллипсометрических исследований тонких пленок разной толщины ниобатов бария-стронция  $Sr_{0,5}Ba_{0,5}Nb_2O_6$  (SBN-50) и  $Sr_{0,61}Ba_{0,39}Nb_2O_6$  (SBN-61), нанесенных на кристаллические подложки  $Al_2O_3$  (0001) и  $MgO$  (001), соответственно.

Для определения таких характеристик прозрачных пленок, как толщина, показатель преломления и его дисперсия, используются спектры оптического пропускания (отражения). Однако эти измерения не дают исчерпывающей информации о характере и толщине поверхностного нарушенного слоя или о пограничном слое пленка-подложка. Более того, если толщина пленки менее четверти длины волны зондирующего излучения, то количественная интерпретация спектров становится просто невозможной. В общем случае информация о оптических свойствах пленки может быть получена из эллипсометрических измерений [4], несмотря на ряд технических трудностей, связанных с интерпретацией результатов измерений.

Эллипсометрия – один из наиболее чувствительных оптических методов исследования поверхности твердых тел, основанный на регистрации изменения параметров эллипса поляризации эллиптически поляризованного света при его отражении от поверхности. Изменение параметров эллипса поляризации, происходящее вследствие взаимодействия электромагнитного излучения с атомами вещества, характеризуется эллипсометрическими углами  $\psi(\varphi)$  и  $\Delta(\varphi)$  ( $\varphi$  – угол падения): угол  $\psi$  связан с изменением геометрических характеристик эллипса поляризации, а угол  $\Delta$  – с изменением фаз составляющих эллиптически поляризованного света при его отражении от поверхности. Высокая чувствительность и информативность эллипсометрического метода по сравнению со спектрометрическими методами обусловлены именно тем, что наряду с изменением интенсивности света регистрируется и изменение фаз отраженного света. Особенно важными эллипсометрические измерения становятся при изучении свойств тонких и сверхтонких гетероструктур, к которым относятся и однослойные покрытия с учетом поверхностного нарушенного слоя и возможного переходного (буферного) слоя пленка-подложка, в котором и происходит главным образом релаксация возникающих при синтезе внутренних напряжений.

#### **Объекты. Методы получения и исследования**

Пленки SBN-50 и SBN-61 выращены методом газоразрядного RF-распыления керамической мишени стехиометрических составов  $\text{Sr}_{0,5}\text{Ba}_{0,5}\text{Nb}_2\text{O}_6$  и  $\text{Sr}_{0,61}\text{Ba}_{0,39}\text{Nb}_2\text{O}_6$  на предварительно подготовленные под гетероэпитаксиальное осаждение монокристаллические подложки  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (0001) и  $\text{MgO}$  (001) толщиной 0,5 mm по технологии [5, 7]. Время напыления SBN-50 на  $\text{Al}_2\text{O}_3$  составило 30 min; время напыления SBN-61 на  $\text{MgO}$  – 5 min, 10 min и 115 min, соответственно.

Эллипсометрические измерения выполнялись с помощью многоугольного отражательного эллипсометра на длине волны гелий-неонового лазера  $\lambda = 632,8 \text{ nm}$ . Эллипсометрические углы  $\psi$  и  $\Delta$  рассчитывались по измеряемым азимутам поляризатора входного плеча эллипсометра и анализатора выходного. Точность измерения азимутов составляет 30'. Дополнительные спектры оптического пропускания гетероструктур снимались в диапазоне длин волн 200–1000 nm на спектрофотометре ShimadzuUV-2450.

#### **Метод обработки результатов эллипсометрических измерений**

Полученные по результатам измерений эллипсометрические углы  $\psi$  и  $\Delta$  являются функциями угла падения  $\varphi$  эллиптически поляризованного света и его длины волны  $\lambda$ , оптических параметров пленки и подложки, толщины пленки и возможных дополнительных слоев. Определение характеристик пленки при известных параметрах подложки сводится к решению основного уравнения эллипсометрии относительно этих параметров

$$e^{i\Delta} \operatorname{tg} \psi = \frac{R^{(p)}}{R^{(s)}}, \quad (1)$$

где  $R^{(p)}$  и  $R^{(s)}$  – амплитудные коэффициенты отражения  $p$ - и  $s$ -поляризованных составляющих эллиптически поляризованной падающей электромагнитной волны. Выражения для коэффициентов отражения в (1) записываются с использованием

соответствующей матрицы рассеяния, компоненты которой определяются моделью, адекватной исследуемой системе пленка-подложка.

В нулевом приближении отражающую поверхность можно рассматривать в виде однослойной однородной и изотропной прозрачной пленки на прозрачной подложке. Задача определения параметров пленки решается методом, изложенным в работах [2, 6-8]. Метод основан на особенностях зависимостей  $\psi(\varphi)$  и  $\Delta(\varphi)$ : при угле падения, равном главному  $\varphi = \varphi_0$ , угол  $\psi$  обращается в нуль, а  $\Delta = \pi/2$  или  $3\pi/2$  (в реальных пленках главному углу соответствует минимум наблюдаемой зависимости  $\psi(\varphi)$ ). При этом

$$\operatorname{Re} \left\{ \frac{R^{(p)}(\varphi_0)}{R^{(s)}(\varphi_0)} \right\} = 0, \quad \text{а} \quad \operatorname{Im} \left\{ \frac{R^{(p)}(\varphi_0)}{R^{(s)}(\varphi_0)} \right\} = \pm 1. \quad (2)$$

В нулевом приближении такой модели показатель преломления пленки  $n = n^{(0)} = \operatorname{tg} \varphi_0$ .

При этом нахождение толщины пленки  $d = d^{(0)}$  сводится к решению первого из уравнений (2) как квадратного относительно величины  $\cos \delta$ , где аргумент представляет собой набег фазы в пленке:

$$\delta = \frac{4\pi}{\lambda} d \sqrt{n^2 - \sin^2 \varphi_0} = \frac{4\pi}{\lambda} d_{\min} \sqrt{n^2 - \sin^2 \varphi_0} + 2m\pi \quad (m=0,1,2,\dots). \quad (3)$$

Если толщина пленки менее четверти длины волны, то  $m = 0$  и  $d^{(0)} = d_{\min}$ . В противном случае возникает необходимость нахождения порядка интерференции  $m$  на длине волны 632,8 nm независимыми методами – например, анализом интерференционных экстремумов в спектре пропускания. Дальнейшее совместное решение уравнений (2) методом последовательных приближений дает значения параметров пленки в первом приближении. Окончательная коррекция результатов, максимально приближающая рассчитанные зависимости  $\psi(\varphi)$  и  $\Delta(\varphi)$  к экспериментальным, осуществляется введением нарушенного и пограничного слоев. Эта процедура выполняется оптимизационными методами: последовательным введением слоев с одним параметром оптимизации – толщиной слоя. Показатель преломления слоя задается как некоторая известная функция (чаще всего линейная), граничные значения которой определяются показателями преломления обрамляющих сред [8].

В эпитаксиальных прозрачных пленках, ориентированных в направлении оптической оси  $c$  одноосного кристалла, фактор анизотропии приводит к дополнительным изменениям в трактовке результатов эллипсометрических измерений. В этом случае уравнение (1) сохраняет свой вид [3,4], но с различием показателей преломления для обыкновенного луча  $n_o$  и необыкновенного  $n_e$ , что связано с изменением амплитуды и фазы отраженной  $p$ -составляющей электромагнитной волны. В определяющей степени, это отклонение от изотропной модели обусловлено изменением набега фазы в слое, равном

$$\delta^{(p)} = \frac{4\pi}{\lambda} d \frac{n_o}{n_e} \sqrt{n_e^2 - \sin^2 \varphi_0^{(p)}}. \quad (4)$$

Полагая в изотропной модели пленки  $n = n_o$  и сравнивая (4) с (3) при заданном значении главного угла  $\varphi_0$ , можно оценить ошибку

$$\frac{\delta^{(p)}}{\delta} = \frac{n_o \sqrt{n_e^2 - \sin^2 \varphi_0}}{n_e \sqrt{n_o^2 - \sin^2 \varphi_0}}, \quad (5)$$

возникающую при анализе эллипсометрических данных без учета анизотропии пленки.

В кристаллах ниобатов бария-стронция рассматриваемых составов  $n_o = 2,3 \div 2,31$  и  $n_e = 2,28 \div 2,29$  [9, 10]. Т.к. в нулевом приближении изотропной модели  $\varphi_0 = \operatorname{arctg} n_o = 66,5^\circ$ , то оценка отношения (5) дает значение 0,999. Таким образом, обработку результатов эллипсометрических измерений пленок ниобатов бария-стронция рассматриваемых составов,



преимущественно ориентированных в направлении оси  $c$ , можно выполнять с использованием изотропной модели пленки, принимая  $n = n_o$ . По указанным причинам можно пренебречь и слабой анизотропией используемых подложек.

### Результаты эллипсометрии пленок SBN-50 и SBN-61

Эллипсометрические измерения показали, что все исследованные SBN-пленки характеризуются естественным направлением роста, которое совпадает с направлением оптической оси  $c$  кристалла (поворот плоскости падения зондирующего луча не приводит к изменению значений эллипсометрических углов  $\psi$  и  $\Delta$ ). На рис. 1 представлены спектры оптического пропускания тонких пленок SBN-61, которые демонстрируют:

- невозможность определения параметров двух сверхтонких пленок SBN-61 только спектрометрическими методами, т.к. их толщина меньше чем  $\lambda / 4$ ;
- возможность определения порядка интерференции на длине волны  $\lambda = 632,8 \text{ nm}$  ( $m = 2$ ).

Поэтому при обработке результатов эллипсометрических измерений для пленок 1 и 2 в (3) принималось  $m = 0$ , а для пленки 3  $m = 2$ .

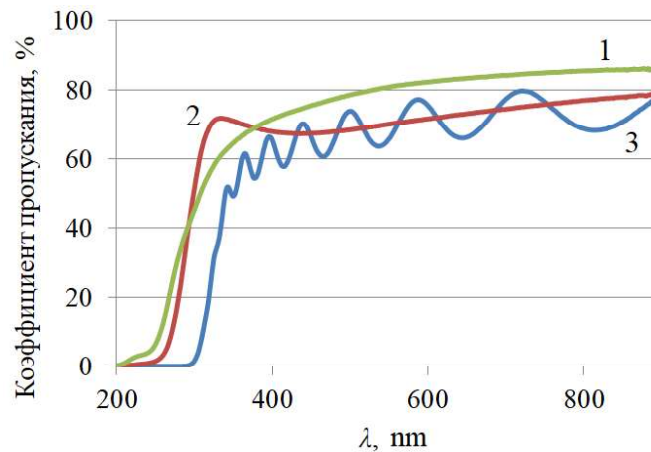


Рис. 1. Спектры пропускания пленок:  
1 – 5 min, 2 – 10 min, 3 – 115 min.

Для всех пленок зарегистрировано отсутствие пограничных слоев; определены параметры нарушенных поверхностных слоев – их толщина и эффективные показатели преломления  $n_{ef}$ , а также соответствующие коэффициенты объемного заполнения  $q$ , определяемые из соотношения

$$\frac{n_{ef}^2 - 1}{n_{ef}^2 + 2} = q \frac{n^2 - 1}{n^2 + 2}.$$

В таблице 1 приведены полученные оптические параметры как ранее полученные для пленок SBN-50 /  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , так и трех исследованных тонких пленок SBN-61 /  $\text{MgO}$  разной толщины.

Таблица 1

Оптические параметры пленок

№ образца	Пленка	Подложка	Время напыления $t$ , min	Толщина базового слоя $d$ , nm	Показатель преломления $n = n_o$	Толщина нарушенного слоя $d_r$ , nm	Коэффициент объемного заполнения $q$
0	SBN-50 [2]	$\text{Al}_2\text{O}_3$ (0001)	30	290	2,3	7	0,625
1	SBN-61	$\text{MgO}$ (001)	5	29	2,3	5	0,6
2			10	42	2,3	5	0,6
3			115	615	2,31	8	0,45

Характерные расчетные зависимости эллипсометрических углов от угла падения зондирующего луча, а также экспериментальные точки для тонкой (2) и самой толстой (3) из SBN-пленок показаны на рис. 2. Рисунок демонстрирует неплохое согласие эксперимента с теорией, подтверждающее адекватность принятой модели реальным пленкам.

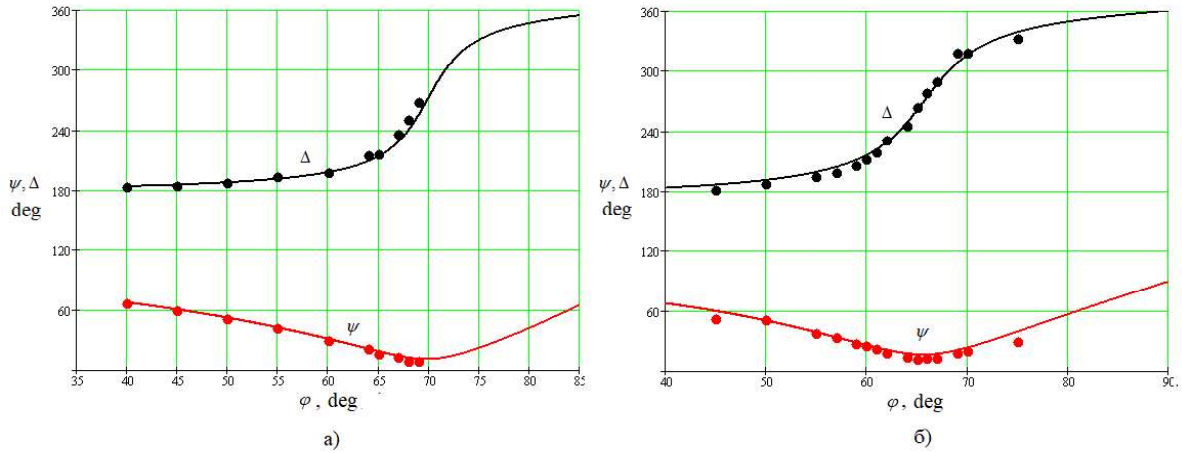


Рис. 2. Зависимость эллипсометрических углов  $\psi$  и  $\Delta$  от угла падения  $\varphi$  пленок: а) – 2 ( $t = 10 \text{ min}$ ), б) – 3 ( $t = 115 \text{ min}$ )

Как видно из таблицы, показатели преломления и профили всех пленок практически не отличаются. При этом наблюдается некоторое увеличение толщины поверхностного нарушенного слоя. Кроме того, показатель преломления самой толстой пленки 3 приближается к значению  $n_o$  кристалла  $\text{Sr}_{0,61}\text{Ba}_{0,39}\text{Nb}_2\text{O}_6$  на длине волны  $632,8 \text{ nm}$  [10]. Возможно, уменьшение значения  $n_o$  в тонких пленках связано с изменением (однозначно зафиксировано увеличение параметра  $c$ ) элементарной ячейки.

Особый интерес в полученных результатах представляет рост толщины поверхностного нарушенного слоя с одновременным уменьшением коэффициента объемного заполнения по мере увеличения времени напыления, что обусловлено, с нашей точки зрения, особенностью роста пленок (механизм Вольмера-Вебера). Исследования морфологии поверхности пленок методами электронной микроскопии подтверждают результаты эллипсометрии о характере нарушенного слоя пленок в зависимости от их толщины (рис.3 а,б).

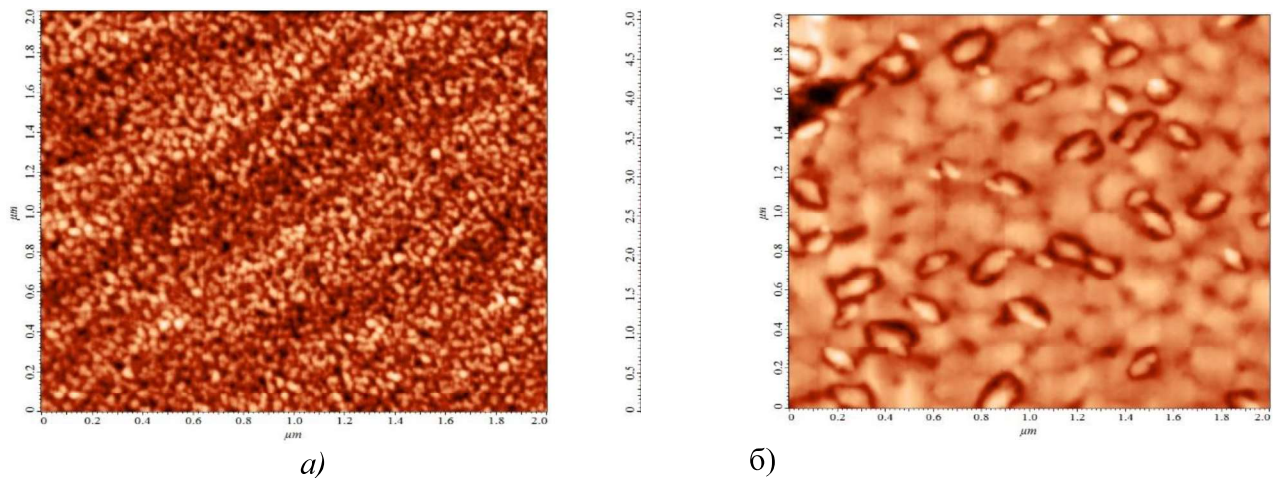


Рисунок 3. Поверхности пленок SBN-61: а) – пленка 1 ( $t = 5 \text{ min}$ ), б) – пленка 3 ( $t = 115 \text{ min}$ ).

## Выводы

1. Методами эллипсометрии установлено, что независимо от толщины все исследованные тонкие пленки SBN-61 / MgO (001) так же, как и пленка SBN-50 / Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(0001) [6], эпитаксиальные с преимущественным направлением роста, параллельным оси с монокристалла. Показано, что анизотропия практически не влияет на результаты эллипсометрических измерений.

2. Определены параметры пленок разной толщины – показатель преломления, толщина базового и поверхностного нарушенного слоев, коэффициент объемного заполнения материалом нарушенного слоя. Установлено отсутствие слоя на границе пленка-подложка.

3. Обнаружено, что толщина нарушенного слоя растет, а коэффициент объемного заполнения уменьшается с увеличением толщины пленок. Наблюдается закономерная тенденция к росту показателя преломления с приближением его значения к максимальному в объемном материале для данного состава [10] по мере увеличения толщины пленки.

## Финансирование работы

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание в сфере научной деятельности, научный проект № 0852-2020-0032), (БА30110/20-3-07ИФ).

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Воротилов К.А., Мухортов В.М., Сигов А.С. Интегрированные сегнетоэлектрические устройства. – М.: Энергоатомиздат, 2011. – 175с.
2. Методы обработки результатов эллипсометрических измерений / В.А. Грицких [и др.] // Труды 7-го международного симпозиума «Физика поверхностных явлений, межфазных границ и фазовые переходы». – Ростов-на-Дону: Общество с ограниченной ответственностью «Фонд науки и образования, 2017. - В. 7. – С. 53-57.
3. Оптическая анизотропия и диэлектрические характеристики пленок Sr<sub>0,50</sub>Ba<sub>0,50</sub>Nb<sub>2</sub>O<sub>6</sub>/Pt(111)/Si(001)/ А.П.Ковтун, С.П.Зинченко, А.В. Павленко, Г.Н. Толмачев // Письма в ЖТФ. - 2016. - Т. 42. - В. 11. – С. 48-55.
4. Основы эллипсометрии/ А.В.Ржанов [и др.]. - Новосибирск: Наука, 1978. – 424 с.
5. Синтез, структура и оптические характеристики тонких пленок ниобата бария-стронция/ Г.Н.Толмачев [и др.]// ФТТ. - 2015. - Т.57. - В.10. – С.2050-2055.
6. Структура и оптические характеристики пленок ниобатов бария-стронция на подложках Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ А.В.Павленко [и др.]// Оптика и спектроскопия. - 2019. - Т.126. - В.5. – С. 570-574.
7. Структура, динамика решетки и диэлектрические характеристики пленок Sr<sub>0,5</sub>Ba<sub>0,5</sub>Nb<sub>2</sub>O<sub>6</sub>/ А.В.Павленко [и др.]// ФТТ. - 2017. - Т.59. – С.888-891.
8. Эллипсометрический метод определения оптических параметров тонкопленочных покрытий со сложной структурой/ А.А.Тихий [и др.]// Оптика и спектроскопия. - 2015. - Т.119. - №2. – С.282-285.
9. Lenzo P.V., Spemcer E.C., Baltman A.A. Electro-optic coefficients of ferroelectrics strontium barium niobate// Appl. Phys. Let. - 1967. - V.11. - №1. - P.23-24.
10. Refractive indices of Ba<sub>0,61</sub>Sr<sub>0,39</sub>Nb<sub>2</sub>O<sub>6</sub> single crystals/ D.Kip [et al]//Physic Status Solidy (a). - 1996. - V.154. - P.K5-K7.