

Научная статья
УДК 620.187
<https://doi.org/10.24143/1812-9498-2024-1-44-53>
EDN BNPDYI

Экспериментальные исследования свойств сверхтонких пленок ниобата лития методами зондовой и электронной микроскопии

*Алла Викторовна Ревина¹✉,
Диана Дмитриевна Гафурова², Виктория Михайловна Тутаринова³*

^{1,3}*Астраханский государственный технический университет,
Астрахань, Россия, alla.revina2104@yandex.ru*

²*Южный федеральный университет,
Ростов-на-Дону, Россия*

Аннотация. Посвящена исследованию физико-химических свойств пленок ниобата лития, изготовленных в различных температурных условиях. Ниобат лития уже используется в оптике, а также обладает огромным потенциалом применения в различных областях науки и техники ввиду возможности возникновения в нем пьезоэлектрического эффекта, нелинейных оптических эффектов, фотоупругости, эффекта Поккельса (более известного как линейный электрооптический эффект). В перспективе ниобат лития может найти применение и в нефтяной промышленности в качестве катализатора для процессов гидрогенирования и дегидрирования, гидрокрекинга, гидроочистки и гидрообработки нефти и нефтепродуктов за счет высокой поверхностной активности, кислотности и термической стабильности, способности образовывать стабильные дисперсии в жидких средах. Исследования проводились с использованием методик сканирующей электронной микроскопии для изучения морфологии поверхности образцов, использования методики зонда Кельвина для измерения потенциала поверхности материала, а также силовой микроскопии пьезоотклика для регистрации пьезоэлектрического эффекта доменных структур. В результате исследований были получены сканы морфологии поверхности образцов, измерен электрический потенциал поверхности, а также зарегистрировано смещение образцов под действием внешнего электрического поля с высоким разрешением, могут быть использованы для создания новых материалов и устройств с высокой производительностью и долговечностью, а также для дальнейшего развития нанотехнологий и наноэлектроники. Планируется проведение дополнительных исследований для изучения других свойств пленок ниобата лития.

Ключевые слова: ниобат лития, морфология, пьезоотклик, силовая зондовая микроскопия, силовая электронная микроскопия, сканирование

Для цитирования: Ревина А. В., Гафурова Д. Д., Тутаринова В. М. Экспериментальные исследования свойств сверхтонких пленок ниобата лития методами зондовой и электронной микроскопии // Нефтегазовые технологии и экологическая безопасность. 2024. № 1. С. 44–53. <https://doi.org/10.24143/1812-9498-2024-1-44-53>. EDN BNPDYI.

Original article

Experimental studies of the properties of ultrathin lithium niobate films using probe and electron microscopy

Alla V. Revina¹✉, Diana D. Gafurova², Victoria M. Tutarinova³

^{1,3}*Astrakhan State Technical University,
Astrakhan, Russia, alla.revina2104@yandex.ru*

²*Southern Federal University,
Rostov-on-Don, Russia*

Abstract. The article is dedicated to the study of the physical and chemical properties of lithium niobate films made under different temperature conditions. Lithium niobate has already found its application in optics and has enormous potential in various technologies due to the emergence of effects such as piezoelectric effect, nonlinear optical effects, photoelasticity effect, and the Pockels effect (linear electro-optical effect). Lithium niobate can also be used in the oil industry as a catalyst for hydrogenation and dehydrogenation processes, hydrocracking, hydrodesulfurization, and hydroprocessing of oil and petroleum products due to its high surface activity, acidity, and thermal stability, as well as its ability to form stable dispersions in liquid media. The studies were carried out using scanning electron microscopy techniques, scanning

electron microscopy techniques, scanning electron microscopy to study the surface morphology of samples, Kelvin probe microscopy to measure the surface potential of the material, and piezoresponse force microscopy to register the piezoelectric effect of domain structures. As a result of the studies, scans of the surface morphology of samples were obtained, the electrical potential of the surface was measured, and the displacement of samples under the influence of an external electric field with high resolution was also registered. The results of the study can be used to create new materials and devices with high performance and durability, as well as for further development of nanotechnology and nanoelectronics. Further research is planned to investigate other properties of lithium niobate films.

Keywords: lithium niobate, morphology, piezoelectric response, force probe microscopy, force electron microscopy, scanning

For citation: Revina A. V., Gafurova D. D., Tutarinova V. M. Experimental studies of the properties of ultrathin lithium niobate films using probe and electron microscopy. *Oil and gas technologies and environmental safety. 2024;1:44-53.* (In Russ.). <https://doi.org/10.24143/1812-9498-2024-1-44-53>. EDN BNPDI.

Введение

Ниобат лития является новым видом малоизученных материалов с большим количеством возможных сфер применения. Например, ниобат лития уже используется в различных приборах и устройствах оптики, таких как модуляторы света, фотонные кристаллы, оптические резонаторы и др. Это связано с тем, что он обладает большим спектром различных физических свойств. Например, ниобат лития является пьезоэлектрическим материалом, что позволяет естественным образом деформировать его под воздействием электрического тока. Кроме того, ему присущ нелинейный оптический эффект, который проявляется при взаимодействии света с кристаллом, в результате чего происходит изменение поляризации материала, которое зависит от интенсивности света. Это явление известно, как эффект второй гармоники. В результате этого происходит удвоение частоты света, что может быть использовано для создания лазеров с высокой мощностью и точностью, а также для генерации света

в ультрафиолетовой области спектра. Помимо развития в направлении оптики ниобат лития может найти применение и в нефтепромышленной сфере в качестве катализатора для процессов гидрогенирования и дегидрирования, гидрокрекинге, гидроочистки и гидрообработки нефти и нефтепродуктов за счет высокой поверхностной активности, кислотности и термической стабильности, способности образовывать стабильные дисперсии в жидких средах.

Целью исследования является анализ различных физических свойств пленок ниобата лития с целью изучения результатов исследования для выявления возможных сфер применения.

Методы и результаты исследования

Для проведения исследований было выбрано 2 образца пленки ниобата лития, полученных методом физического осаждения из паровой фазы (PVD) при различных температурах: 100 °C (образец № 1) и 600 °C (образец № 2) (табл. 1) [1].

Таблица 1

Table 1

Параметры осаждения образцов ниобата лития

Deposition parameters of lithium niobate samples

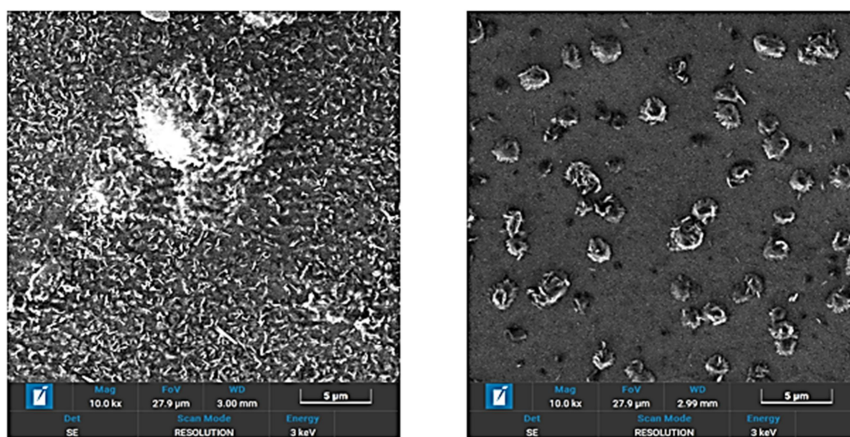
Параметр	Образец № 1, 100 °C	Образец № 2, 600 °C
Количество лазерных импульсов	50 000	
Давление кислорода, Торр	$1 \cdot 10^{-2}$	
Расстояние мишень-подложка, мм	75	
Температура подложки, °C	100	600
Энергия лазерного излучения, мДж	150	

Перед проведением исследований образцы необходимо очистить от загрязнений, полученных при транспортировке, для этого была использована ультразвуковая ванна. Чистка проходила поэтапно: первым этапом был использован изопропиловый спирт для удаления биологических загрязнений (жировых и потовых выделений кожного покрова человека), вторым этапом применялась дистиллированная вода для удаления более крупных загрязнений и остатков спирта.

Исследование поверхности методом силовой электронной микроскопии

Первым этапом исследования являлось получение

топологического изображения поверхности. Морфология поверхности необходима для изучения ее с точки зрения правильности ее осаждения, а также для того, чтобы убедиться в равномерности распределения материала пленки, его однородности и обнаружения дефектов, если они присутствуют. Также морфология позволяет выбрать более удобную зону для дальнейших исследований, а также убедиться в чистоте материала, отсутствии загрязнений и иных объектов, которые могут пагубно повлиять на итоговые результаты исследования (рис. 1).



a

б

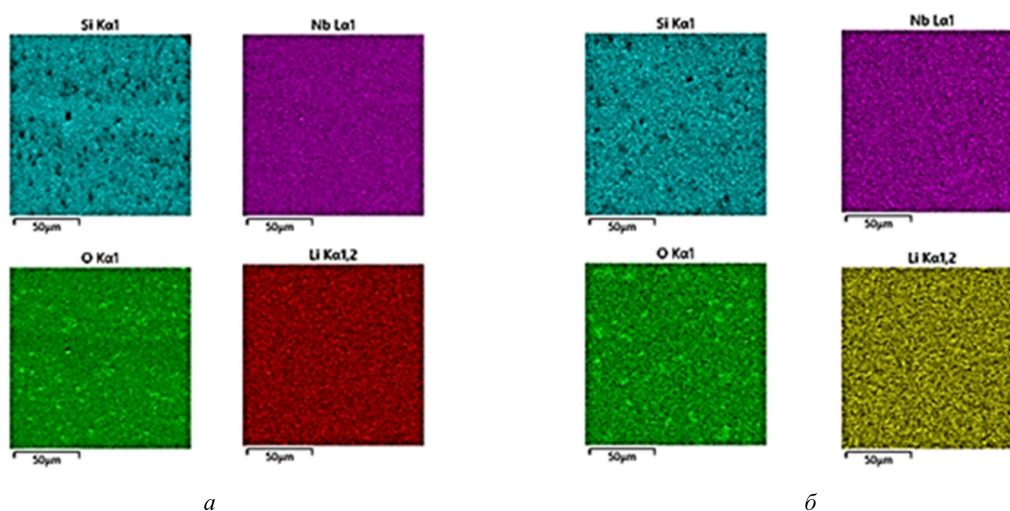
Рис. 1. Морфология поверхности образцов: *a* – образец № 1; *б* – образец № 2

Fig. 1. Surface morphology of samples: *a* – sample N. 1; *б* – sample N. 2

На рис. 1 видно, что разная температура сильно сказывается на итоговом формообразовании пленки: образец № 1 имеет мало выраженные крупные неровности, образец № 2 имеет более рельефно выраженные образования. При этом видно, что материал сформирован правильно, не имеет внешних загрязнений и сильных дефектов, также можно наблюдать большое количество «засвеченных» зон на снимке, что говорит о том, что на поверхности образца образуются электронные туманности, которые улавливаются детектором микроскопа. Такое явление чаще всего происходит на образцах, которые имеют диэлектрические свойства.

После изучения полученных снимков поверхности образца был проведен энергодисперсионный анализ для изучения элементного состава образца, проверка наличия или отсутствия посторонних

химических элементов в составе материала. Также энергодисперсионный анализ позволил различить, где больше накоплено того или иного химического элемента на пленке для дальнейшего изучения. Полученные снимки производились с помощью дополнительного модуля – рентгенофлуоресцентного анализатора на электронном микроскопе. Данный модуль регистрирует рентгеновские излучения возбужденных атомов вследствие воздействия на них электронным пучком с пушки микроскопа. Он сопоставляет данные с уже существующим стандартном каталогом химических элементов при таком воздействии и составляет карту распределения зарегистрированных датчиком импульсов: чем выше интенсивность излучения в определенной зоне, тем ярче оно изображено на карте распределения (рис. 2).



a

б

Рис. 2. Энергодисперсионный анализ образцов: *a* – образец № 1; *б* – образец № 2

Fig. 2. Energy dispersive analysis of samples: *a* – sample N. 1; *б* – sample N. 2

Далее с помощью наложения полученных данных друг на друга была получена карта распре-

ления всех химических элементов на данном участке образца (рис. 3).

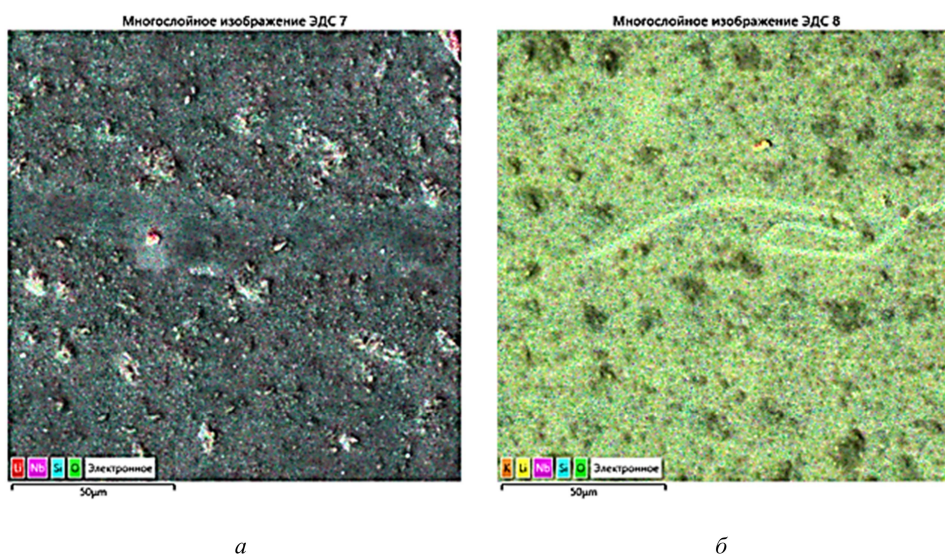


Рис. 3. Многослойное изображение энергодисперсионного состава: *a* – образец № 1; *б* – образец № 2

Fig. 3. Multilayer image of energydispersive composition: *a* – sample N. 1; *б* – sample N. 2

Исследования образцом на сканирующем зондовом микроскопе

После полученных данных на сканирующем электронном микроскопе было принято решение перейти к определению поверхностного электрического потенциала образцов методом зонда Кельвина, а также к измерению пьезоэлектрических свойств методом силовой микроскопии пьезоотклика. Метод зонда Кельвина основывается на двухпроходной методике: в первом проходе определяется рельеф поверхности образца с использованием прерывисто-контактного метода (колебания зонда-кантилевера возбуждаются механически) [2], а на втором проходе этот рельеф отслеживается при прохождении образцом на некоторой высоте для измерения разницы потенциалов между зондом и образцом. Силовая микроскопия пьезоотклика позволяет зарегистрировать смещения образцов под действием внешнего электрического поля с высоким разрешением [3].

Первым этапом исследования является подготовка микроскопа к работе с данными образцами. В него устанавливается специальный зонд-кантилевер – микроскопическая игла с диаметром на острие от 1 до 5 атомов, которая выращена на стержне с отражающей поверхностью на лицевой стороне. Такая поверхность необходима для отражения специального лазерного пучка, с помощью которого сканирующий зондовый микроскоп собирает информацию об изменении упругой деформации кантилевера при взаимодействии с поверхностью, а также для настройки раскачки зонда при

сканировании в полуконтактной методике. Каждая модель зонда имеет свой набор характеристик: длина кантилевера, для какой методики он был создан, жесткость зонда, частота колебаний при работе в различных методиках, а также его свойства проводимости и жесткость. Для проведения исследования методикой Кельвина необходим зонд с коротким кантилевером (не более 235 нм) для полуконтактных методик – с поверхностным проводящим слоем (золото или платина). После выбора зонда необходимо установить его на специальную сканирующую головку в камере микроскопа, после чего приступить к фокусировке лазера детектора на кантилевере, раскатать зонд до резонансной частоты и выровнять фазу колебаний, а также задать амплитуду колебаний зонда (в нашем случае $A_{mp} = 50$). После настройки зонда кантилевера его необходимо подвести к поверхности так, чтобы при раскатке в нижней точке он касался поверхности образца. Силу прижима зонда к поверхности можно регулировать с помощью обратной связи.

После предварительной настройки сканирующего зондового микроскопа, в первую очередь, необходимо получить морфологический скан поверхности образца. Это нужно для выбора зоны дальнейшего исследования другими методиками и предварительной очистки поверхности от внутреннего напряжения и мелких загрязнений. Сканирование проходило в полуконтактной методике, параметры сканирования настраивались с помощью встроенного искусственного интеллекта ScanTronic (рис. 4).

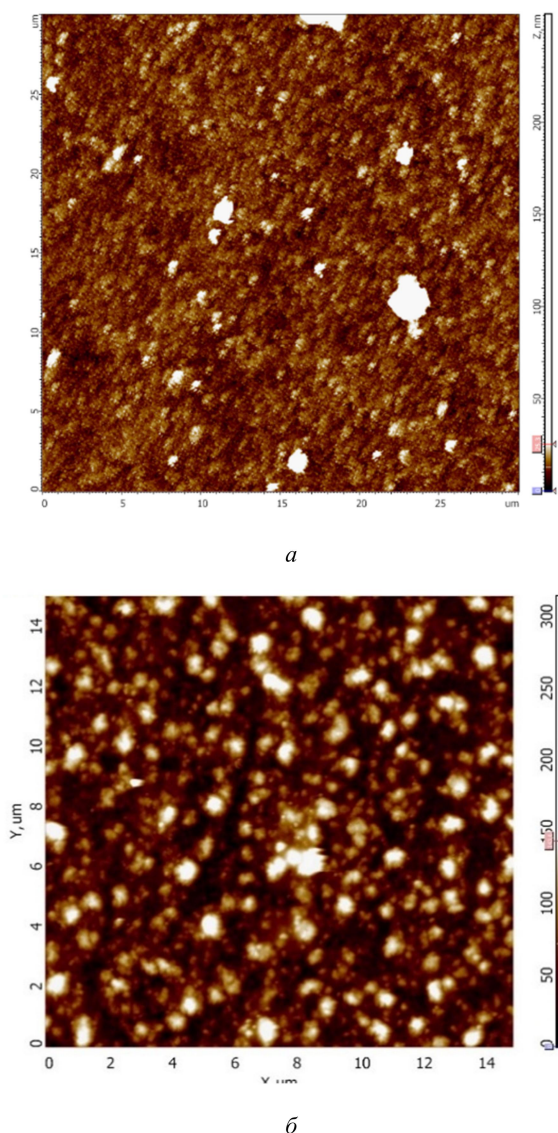


Рис. 4. Морфология поверхности:
a – образец № 1; *б* – образец № 2

Fig. 4. Surface morphology:
a – sample N. 1; *б* – sample N. 2

На рис. 4 более наглядно видна разница между образцами, при использовании одинаковых параметров топология поверхности имеет большое количество различий: образец № 1 имеет более равномерную структуру, образец № 2 демонстрирует большое количество различных образований.

После получения морфологии поверхности образцов прерывисто-контактной методикой провели сканирование методом зонда Кельвина. Зонд был подобран изначально для данной методики, поэтому он в замене не требуется, однако стоит отметить, что при подаче на зонд любого электрического заряда его износ намного выше. Сканирование проходило в два этапа, для этого было подано

напряжение -5 В, потом $+5$ В (рис. 5, 6), значение пропорционально для того, чтобы увидеть четкую границу изменений потенциала.

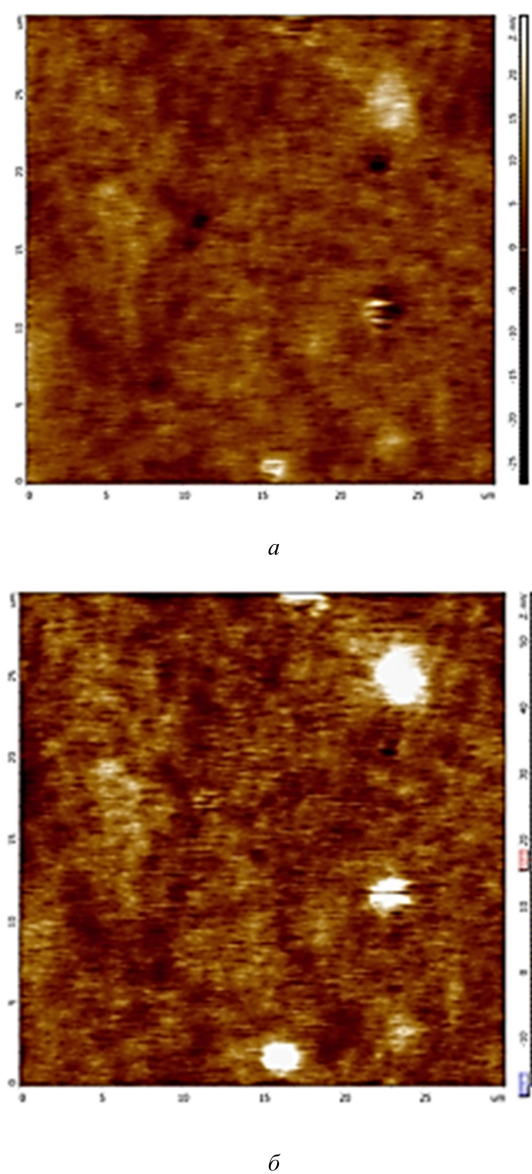


Рис. 5. Изображение методом зонда Кельвина, образец № 1, напряжение: *a* – -5 В; *б* – $+5$ В

Fig. 5. Kelvin probe image, sample N. 1, voltage: *a* – -5 В; *б* – $+5$ В

Из рис. 5, 6 видно, что пороговое значение показателя проходящего напряжения очень мало, не достигает 200 мВ при исходном напряжении 5 В. Это демонстрирует то, что данные образцы ниобата лития являются диэлектриками. При этом на изображении образца № 1 при напряжении 5 В заметно, что крупные доменные структуры имеют больший потенциал относительно остальной поверхности [4].

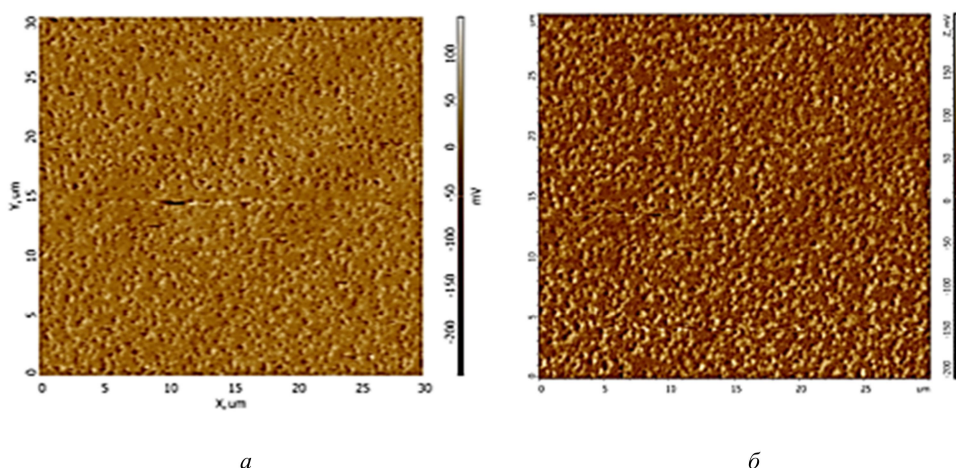


Рис. 6. Изображение методом зонда Кельвина, образец № 2, напряжение: *a* – –5 В; *б* – +5 В

Fig. 6. Kelvin probe image, sample N. 2, voltage: *a* – –5 V; *б* – +5 V

Это может быть обусловлено тем, что более крупные объекты подвергаются большей внешней нагрузке при сканировании, т. к. зонд во время работы не перемещается по высоте, амплитуда также остается неизменной. При такой нагрузке есть вероятность упругой деформации домена, что приведет к образованию заряда на поверхности домена и увеличению его электрического потенциала, что уже является косвенным доказательством пьезоотклика у материала. Для наглядной фиксации данного явления перешли к регистрации обратного пьезоотклика с помощью воздействия электрического поля методом силовой микроскопии пьезоотклика.

Измерение обратного пьезоотклика требует зонд с проводящей поверхностью и длинным кантилевером для работы в контактных методиках [2, 3], при этом зонд требуется достаточно мягкий для избежания внешних механических деформаций путем давления на поверхность, жесткостью не более 0,05 Н/м. Для измерения пьезоотклика область сканирования в этом случае не будет превышать более 5×5 мкм, т. к. постоянное воздействие электрическим током на зонд в контактной методике быстро его изнашивает, из-за чего трудно проводить несколько измерений с одной и той же группой доменов для сравнения.

Перед измерением пьезоотклика также необходимо получить морфологию изучаемой поверхности материала *P*, чтобы найти более удачную область для измерения с отчетливой группой предполагаемых доменов различного размера.

Подтверждением наличия пьезоотклика у материала является деформация различных объектов на рис. 7.

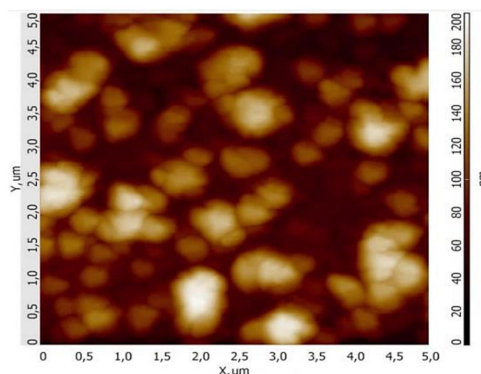


Рис. 7. Морфология поверхности образца для сканирования пьезоотклика (5×5 мкм)

Fig. 7. Sample surface morphology for scanning piezoelectric response (5×5 microns)

При таком исследовании зонд работает по двух-проходной методике: зонд под напряжением в первом проходе перемещается в вертикальном направлении для регистрации деформации объектов по оси *Y*, после чего совершает второй проход в латеральном направлении для регистрации деформации по оси *X*. На основании полученных результатов появится возможность сравнить объекты с исходным изображением зоны исследования. При этом во время проведения сканирования в помещении и внутри камеры сканирующего зондового микроскопа температура должна быть постоянной, чтобы предотвратить регистрацию ложных данных из-за влияния температурного расширения или сужения площади образца из-за разницы температур перед, во время и после сканирования (локально для атомно-силовой микроскопии – термодрейфа). Для сканирования на зонд было подано напряжение 5 В при температуре 20 °С (рис. 8).

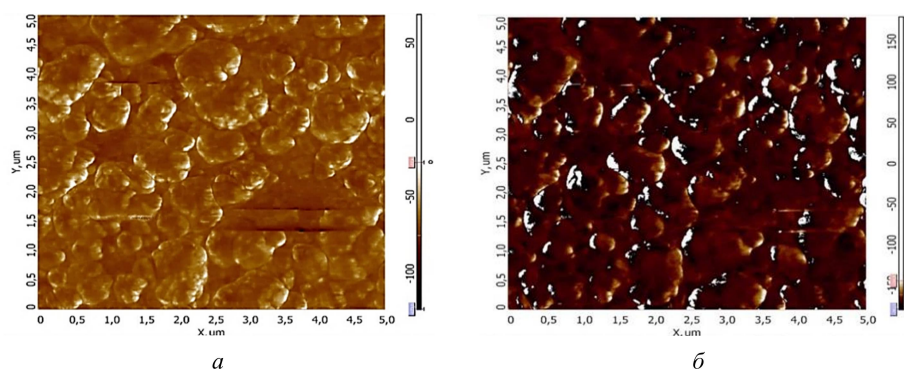


Рис. 8. Измерение деформации поверхности: *a* – по оси *X*; *б* – по оси *Y*

Fig. 8. Surface deformation measurement: *a* – the *X* axis; *б* – the *Y* axis

На рис. 8 видно большое количество отклонений от исходного размера в отрицательную сторону, т. е. сжатия некоторых объектов от подачи на него электрического заряда. Это подтверждает наличие у поверхности обратного пьезоэффекта, когда объект под действием электрического заряда образует внутреннее механическое напряжение.

Следующим этапом исследования была проверка влияния температурного расширения материала на его свойства, подтвержденные ранее. Для этого измеряли электрический потенциал поверхности методом зонда Кельвина при различных температурах: 20 (было проведено ранее), 50 и 75 °С, а также измерили обратный пьезоэффект с аналогичными температурами.

Для проведения данных исследований использовался термостойлик с функцией постоянного поддер-

жания заданной температуры. Данный модуль равномерно прогревает весь образец с подложки, при этом через короткий промежуток времени (1–3 с) снимает значения температуры с верхней части образца (поверхности) для максимально точного поддержания заданной температуры.

Зонд использовался с такими же характеристиками, как и в предыдущем исследовании методикой зонда Кельвина, параметры остались неизменными, однако область сканирования была выбрана другая, с большим объектом для более наглядного эффекта температурного расширения материала, расположения зонда и места сканирования оставались неизменными. На рис. 9 представлены сканы поверхностного материала при описанных ранее параметрах температуры, напряжение электрического заряда зонда составляет 10 В.

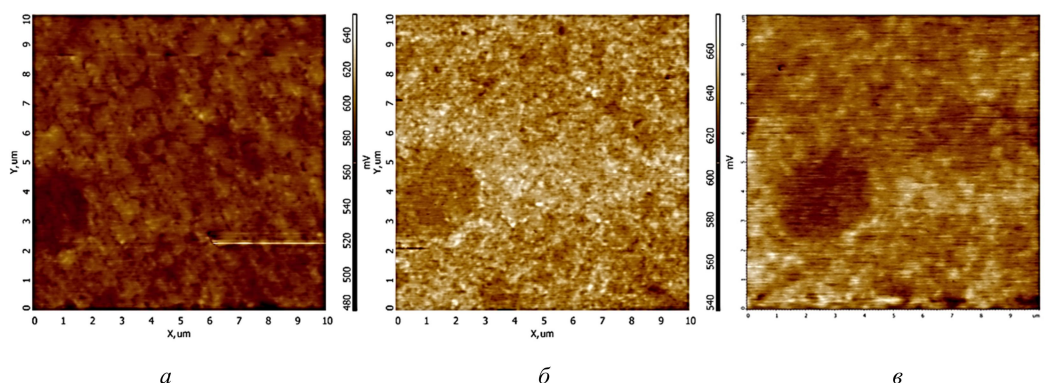


Рис. 9. Поверхностный потенциал образца при различных параметрах температуры: *a* – 20 °С; *б* – 50 °С; *в* – 75 °С

Fig. 9. Surface potential of the sample for different temperature parameters: *a* – 20°C; *б* – 50°C; *в* – 75°C

На рис. 9 видно, как при повышении температуры происходит термодрейф по оси *X*, что связано с особенностями конфигурации оборудования. При этом, исходя из значений, видно, что до 50 °С поверхностный потенциал увеличивается по верхнему значению, хоть и незначительно. Однако при дальнейшем нагреве потенциал падает в полтора раза при одинаковом напряжении, из чего следует, что оптимальная температура работы с ниобатом лития не превышает 50 °С, при более высоких тем-

пературах свойства вырабатывать и накапливать заряд ухудшаются. Чтобы это подтвердить, провели аналогичное исследование обратного пьезоэффекта при такой же конфигурации температур. Полученные изображения представлены на рис. 10, также к ним прикреплены морфологические карты образцов, т. к. зонд под температурным и электрическим воздействием очень быстро изнашивался, проводить исследования в одной и той же области не удалось.

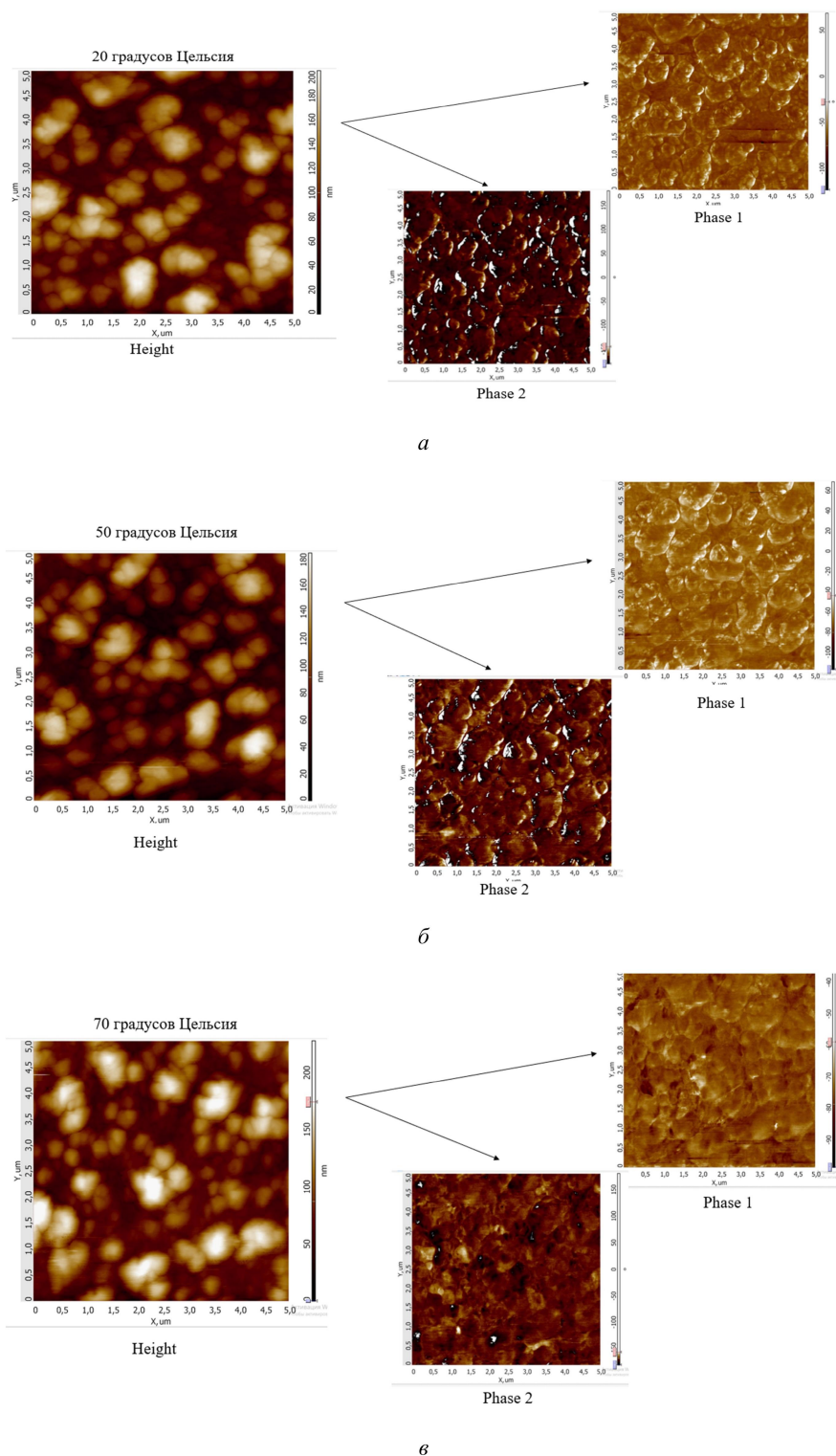


Рис. 10. Исследование обратного пьезоэффекта:
а – при 20 °С; б – при 50 °С; в – при 75 °С;
Height – морфология поверхности; Phase 1 – латеральные деформации; Phase 2 – векторные деформации

Fig. 10. Investigation of the reverse piezoelectric effect:
а – at 20°C; б – at 50°C; в – at 75°C;
Height – surface morphology; Phase 1 – lateral deformities; Phase 2 – vector deformations

На рис. 10 прослеживается схожая закономерность с измерением методом зонда Кельвина – также до 50 °С отчетливо замечен обратный пьезоэффект с характерным сжатием и затемнением на снимке, но при 75 °С эффект заметно ослабевает [5].

Заключение

Проведя серию исследований [6] с помощью различных методик [2, 3], изучили свойства ниобата

лития, подтвердили его диэлектрические свойства и смогли обнаружить обратный пьезоэффект при различных параметрах температур поверхности.

В будущем планируется проводить исследования с помощью магнитно-силовой микроскопии, исследовать физические свойства ниобата лития, такие как жесткость, адгезия, модуль Юнга и т. д., а также проводить исследования на монокристаллических образцах ниобата лития.

Список источников

1. Галуцкий В. В., Строганова Е. В., Кузора В. Ф. и др. Модель оптических логических элементов на основе PPLN-преобразователя из градиентного ниобата лития // Наука и мир. 2014. Т. 4-1 (8). С. 18–22.

2. Ревина А. В. Использование контактного и прерывисто-контактного методов сканирующей зондовой микроскопии при исследовании нанорельефа // Материалы 61-й Международ. науч. конф. науч.-педагог. работников Астрахан. гос. техн. ун-та. Астрахань: Изд-во АГТУ, 2017. URL: <https://astu.org/Content/Page/5833> (дата обращения: 29.01.2024).

3. Ревина А. В., Ревин С. А. Использование сканирующего зондового микроскопа с целью изучения и модификации поверхностей наноразмеров // Материалы Международ. науч. конф. науч.-педагог. работников Астрахан. гос. техн. ун-та, посвящ. 85-летию со дня основания вуза. Астрахань: Изд-во АГТУ, 2015. URL: <https://astu.org/>

Content/Page/5833 (дата обращения: 29.01.2024).

4. Гусева Л. М. Исследование некоторых оптических характеристик сегнетоэлектрика ниобата лития // Изв. АН СССР. Отд-ние физ. наук. 1967. Т. 31, № 7. С. 1161–1163.

5. Chen Y., Xu J., Zhang W., Shu Y., Lou C., Kong Y., Huang Z., Zhang G. Determination of the Li/Nb ratio in LiNbO₃ crystals prepared by vapor transport equilibration method // Optical Materials. 2003. V. 23, N. 1-2. P. 295–298.

6. Ревина А. В., Ревина Н. С., Лямина Н. Ф. Исследование морфологических параметров неорганических веществ контактным методом сканирующей зондовой микроскопии // Новейшие технологии освоения месторождений углеводородного сырья и обеспечение безопасности экосистем Каспийского шельфа: материалы VIII Международ. науч.-практ. конф. Астрахань: Изд-во АГТУ, 2017. С. 224–228.

References

1. Galutskii V. V., Stroganova E. V., Kuzora V. F. i dr. Model' opticheskikh logicheskikh elementov na osnove PPLN-preobrazovatel'ia iz gradientnogo niobata litiia [A model of optical logic elements based on a PLN converter made of gradient lithium niobate]. *Nauka i mir*, 2014, Vol. 4-1 (8), pp. 18-22.

2. Revina A. V. Ispol'zovanie kontaktnogo i preryvисто-kontaktnogo metodov skaniruiushchei zondovoi mikroskopii pri issledovanii nanorel'efa [The use of contact and intermittent contact methods of scanning probe microscopy in the study of nanorelief]. *Materialy 61-i Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii nauchno-pedagogicheskikh rabotnikov Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. Astrakhan', Izd-vo AGTU, 2017. Available at: <https://astu.org/Content/Page/5833> (accessed: 29.01.2024).

3. Revina A. V., Revin S. A. Ispol'zovanie skaniruiushchego zondovogo mikroskopa s tsel'iu izucheniia i modifikatsii poverkhnostei nanorazmerov [Using a scanning probe microscope to study and modify nanoscale surfaces]. *Materialy Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii nauchno-pedagogicheskikh rabotnikov Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, posviashchennoi 85-letiiu so dnia osnovaniia vuza*. Astrakhan', Izd-vo AGTU, 2015.

Available at: <https://astu.org/Content/Page/5833> (accessed: 29.01.2024).

4. Guseva L. M. Issledovanie некотorykh opticheskikh kharakteristik segnetoelektrika niobata litiia [Investigation of some optical characteristics of lithium niobate ferroelectric]. *Izvestiia AN SSSR. Otdelenie fizicheskikh nauk*, 1967, vol. 31, no. 7, pp. 1161-1163.

5. Chen Y., Xu J., Zhang W., Shu Y., Lou C., Kong Y., Huang Z., Zhang G. Determination of the Li/Nb ratio in LiNbO₃ crystals prepared by vapor transport equilibration method. *Optical Materials*, 2003, vol. 23, no. 1-2, pp. 295–298.

6. Revina A. V., Revina N. S., Liamina N. F. Issledovanie morfologicheskikh parametrov neorganicheskikh veshchestv kontaktnym metodom skaniruiushchei zondovoi mikroskopii [Investigation of morphological parameters of inorganic substances by the contact method of scanning probe microscopy]. *Noveishie tekhnologii osvoeniia mestorozhdenii uglevo-dorodnogo syr'ia i obespechenie bezopasnosti ekosistem Kaspiiskogo shel'fa: materialy VIII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Astrakhan', Izd-vo AGTU, 2017. Pp. 224-228.

Статья поступила в редакцию 01.02.2024; одобрена после рецензирования 08.02.2024; принята к публикации 13.02.2024
The article was submitted 01.02.2024; approved after reviewing 08.02.2024; accepted for publication 13.02.2024

Информация об авторах / Information about the authors

Алла Викторовна Ревина – кандидат технических наук, доцент; доцент кафедры общинженерных дисциплин и наземного транспорта; Астраханский государственный технический университет; alla.revina2104@yandex.ru

Alla V. Revina – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor; Assistant Professor of the Department of General Engineering and Ground Transport; Astrakhan State Technical University; alla.revina2104@yandex.ru

Диана Дмитриевна Гафурова – студент кафедры электроники и наноэлектроники; Южный федеральный университет; d.gafurova11@yandex.ru

Diana D. Gafurova – Student of the Department of Electronics and Nanoelectronics; Southern Federal University; d.gafurova11@yandex.ru

Виктория Михайловна Тутаринова – студент кафедры технологических машин и оборудования; Астраханский государственный технический университет; Viktoria2005@mail.ru

Victoria M. Tutarinova – Student of the Department of Technological Machines and Equipment; Astrakhan State Technical University; Viktoria2005@mail.ru

