

<https://doi.org/10.21869/2223-1528-2022-12-1-174-189>



Особенности поляризации ленгмюровских пленок титаната бария при электрическом воздействии

А. П. Кузьменко¹, И. В. Локтионова¹, П. В. Абакумов¹,
Е. А. Новиков¹, А. С. Сизов¹, А. В. Кузько¹

¹ Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: apk3527@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Сформировать пленочную структуру из коллоидной системы BaTiO_3 методом Ленгмюра – Блоджетт и охарактеризовать ее поляризационные свойства с привлечением современных наноинструментальных методов.

Методы. Определение химической структуры по комбинационному (рамановскому) рассеянию света; исследование поляризации пленки на сканирующем зондовом микроскопе в режиме микроскопии зонда Кельвина.

Результаты. Из коллоидной системы стабилизированных наночастиц титаната бария получены многослойные пленочные структуры Ленгмюра – Блоджетт. Методом комбинационного (рамановского) рассеяния света подтверждена их химическая структура: наблюдались линии, соответствующие как тетрагональной, так и кубической структуре титаната бария, а также обнаружены линии, вызванные поперечными и продольными оптическими колебаниями. По диэлектрическому гистерезису установлены значения коэрцитивных полей (624 и 1056 кВ/см) и поле смещения (216,5 кВ/см). Поляризация нанопленки из титаната бария на стеклянной подложке с платиновым подслоем исследовалась по контрасту оттенков на изображениях, полученных методом микроскопии зонда Кельвина. Показано, что наиболее предпочтительным материалом подложки, способствующим усилению поляризации, является платина. Произведена последовательная запись областей в форме квадратов (информационных бит) при положительном, а затем при отрицательном напряжении, установлена функциональная зависимость величины остаточной поляризации от напряжения.

Заключение. В пленочных структурах, сформированных из наночастиц титаната бария методом Ленгмюра – Блоджетт, методом зонда Кельвина под действием напряжения разных знаков с помощью кантилевера атомно-силового микроскопа созданы и исследованы микроразмерные поляризованные структуры, анализ профилей которых показал, что достигнутая при этом контрастность составила 50:1 для светлых и 600:1 для темных изображений.

Ключевые слова: метод Ленгмюра – Блоджетт; сегнетоэлектрики; титанат бария; сегнетоэлектрическая поляризация.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Особенности поляризации лэнгмюровских пленок титаната бария при электрическом воздействии / А. П. Кузьменко, И. В. Локтионова, П. В. Абакумов, Е. А. Новиков, А. С. Сизов, А. В. Кузько // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2022. Т. 12, № 1. С. 174–189. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2022-12-1-174-189>

Поступила в редакцию 19.01.2022

Подписана в печать 21.02.2022

Опубликована 30.03.2022

Features of Polarization of Langmuir Films of Barium Titanate Under Electric Influence

Alexandr P. Kuzmenko¹✉, Inna V. Loktionova¹, Pavel V. Abakumov¹,
Evgeny A. Novikov¹, Alexandr S. Sizov¹, Anna V. Kuzko¹

¹ Southwest State University
50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: apk3527@mail.ru

Abstract

Purpose of research. Form a film structure from the BaTiO₃ colloidal system by the Langmuir-Blodgett method and characterize its polarization properties using modern nanoinstrumental methods.

Methods. Determination of the chemical structure by Raman light scattering; study of film polarization on a scanning probe microscope in the Kelvin probe microscopy mode.

Results. From a colloidal system of stabilized barium titanate nanoparticles, Langmuir–Blodgett multilayer film structures were obtained. Their chemical structure was confirmed by the method of Raman (Raman) light scattering: lines corresponding to both the tetragonal and cubic structures of barium titanate were observed, and lines caused by transverse and longitudinal optical vibrations were also found. The values of the coercive fields (624 and 1056 kV/cm) and the displacement field (216.5 kV/cm) were determined from the dielectric hysteresis. The polarization of a barium titanate nanofilm on a glass substrate with a platinum sublayer was studied by the contrast of shades in images obtained by Kelvin probe microscopy. It has been shown that platinum is the most preferable substrate material that enhances polarization. Sequential recording of areas in the form of squares (information pits) was performed at a positive and then at a negative voltage, from which the functional dependence of the residual polarization on voltage was established.

Conclusion. The Langmuir-Blodgett method makes it possible to form film structures from barium titanate nanoparticles and study their polarization properties. Using the Kelvin probe microscopy, it was possible to polarize the films with voltages of different signs and to analyze the profiles of the obtained contrast images with different polarizations on an atomic force microscope: 50:1 and 600:1 for light and dark areas, respectively.

Keywords: Langmuir-Blodgett method; ferroelectrics; barium titanate; ferroelectric polarization.

Conflict of interest: The authors declares the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Kuzmenko A. P., Loktionova I. V., Abakumov P. V., Novikov E. A., Sizov A. S., Kuzko A. V. Features of Polarization of Langmuir Films of Barium Titanate Under Electric Influence. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii* = *Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2022; 12(1): 174–189. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2022-12-1-174-189>

Received 19.01.2022

Accepted 21.02.2022

Published 30.03.2022

Введение

Квазидвумерные структуры из стабилизированных наночастиц титаната бария (SNPs BTO) уже длительное время находят достаточно широкое практическое применение в виде пленочных структур из BaTiO_3 в элементах памяти [1–5], конденсаторах повышенной емкости [6–9], СВЧ-устройствах [10–13]. В ВТО, являющихся по физической природе сегнетоэлектрическими материалами, важную роль в структурах и элементах, создаваемых из них, играют электронные свойства, которые существенно зависят от их чистоты и бездефектности, определяемых технологиями получения. К примеру, пленки ВТО, полученные методом осаждения из газовой фазы на подложках Pt/MgO при температуре 873 К, в исходном состоянии представлены гранулярной разупорядоченной структурой, которая при температуре 973 К трансформировалась в столбчатую [14]. В золь-гель-пленках ВТО на подложках из кремния после отжига (873 К) отмечен рост степени кристалличности [15]. Пленки BTO/SrRuO_3 на горячей подложке (873 К) толщиной 150 нм при импульсном лазерном осаждении с допированием Nb (1% атом) обладали способностью к быстрому переключению поляризации [2]. Кубическая фаза пленок ВТО, напыленных методом пиролиза из аэрозоля на подложку, оказалась сильно неоднородной, что негативно отражалось в их сегнетоэлектри-

ческих свойствах [16]. Достаточно качественная пленочная структура была получена методом химического осаждения из плотноупакованных кристаллических зерен ВТО на кремниевой подложке с буферным слоем оксинитрата лантана [17]. По нашим данным [18], впервые полученные методом Ленгмюра – Блоджетт пленочные структуры из SNPs BTO были высокооднородными и продемонстрировали наиболее стабильные сегнетоэлектрические свойства.

Задачами настоящего исследования являлись:

- комплексная характеристика пленочных структур, сформированных на водной субфазе методом Ленгмюра – Блоджетт из стабилизированной олеатом натрия коллоидной системы (КС) SNPs BTO;

- исследование поляризационных свойств полученных пленочных структур.

Материалы и методы

В термостабилизированном режиме с помощью молекулярного конструктора Ленгмюра – Блоджетт на установке KSV NIMA 2002 формировались пленки из стабилизированной олеатом натрия коллоидной системы (КС) SNPs BTO. Структурные особенности пленочных монослоев исследовались на сканирующем зондовом микроскопе (СЗМ) типа SmartSPM 1000, AIST-NT в полуконтактном режиме, а их поляризационные свойства – в режиме микроскопии зонда Кельвина (ЗК).

Химическая структура пленок SNPs ВТО была изучена методом комбинационного (рамановского) рассеяния света (КРС). Ленгмюровские нанопленки (ЛНП) для исследования этим методом наносились на так называемые SERS-подложки (Surface-Enhanced Raman Scattering), позволяющие реализоваться эффекту гигантского усиления рамановского рассеяния [19]. Данная схема формирования обусловлена тем, что количество молекул в нанопленке, рассеивающих инициирующее лазерное излучение, на несколько порядков меньше, чем в объемном образце, что существенно ослабляет и без того слабый сигнал КРС. Для возникновения эффекта SERS на подложку из кремния были осаждены наночастицы серебра. Локальная напряженность поля E_{loc} внутри такой частицы [19].

$$E_{\text{loc}}(\omega) = \frac{3E}{\varepsilon_{\text{мет}}(\omega) + 2} \quad (1)$$

определяется напряжённостью внешнего поля E и диэлектрической проницаемостью материала $\varepsilon_{\text{мет}}$, обладающей дисперсионной зависимостью $\varepsilon_{\text{мет}} = \varepsilon_{\text{мет}}(\omega)$. Согласно (1) при $\omega = \omega_{\text{рез}}$ возникает резонанс так, что $\varepsilon_{\text{мет}}(\omega_{\text{рез}}) = -2$, когда напряженность $E_{\text{loc}}(\omega_{\text{рез}})$ резко возрастает и, как следствие, значительно увеличивается интенсивность рассеянного излучения от пленок, нанесенных на такие подложки за счет возбуждения поверхностных плазмонов [19].

Описанный эффект позволил нам исследовать нанопленки SNPs ВТО, осажденные на SERS-подложки. Использованы подложки модели «EnSubstrates» из монокристаллического кремния с наночастицами серебра с гомогенным размером 2 нм, когда коэффициент усиления 10^7 (Enhanced Spectrometry, Inc., г. Черногловка). Исследования выполнялись на рамановском конфокальном микроспектрометре AIST-NT OmegaScope ($\lambda = 532$ нм, $P = 50$ мВт, спектральное разрешение $0,8 \text{ см}^{-1}$, пространственное разрешение $0,25 \text{ мкм}$).

На СЗМ методом ЗК была исследована поляризация ЛНП толщиной 56 нм на стеклянной подложке с платиновым подслоем. В роли зонда выступал проводящий кантилевер (NSC14/Ti-Pt, радиус зонда $R = 30$ нм, жесткость консоли кантилевера 5 Н/м). Первое сканирование производилось в контактном режиме со скоростью 5 мкм/с по схеме «зонд-нанопленка из SNPs ВТО» для формирования изображения рельефа поверхности (обозначено I на рис. 1, а и б). Область поляризации (в форме квадратов) создавалась кантилевером в режиме СЗМ с учетом линейной зависимости [20] между поляризацией P и напряженностью электрического поля E : $P(E)$. Между зондом кантилевера и нанопленкой из SNPs ВТО прикладывалось постоянное напряжение заданной величины U . В схеме «зонд – нанопленка из SNPs ВТО» возникало электрическое поле с напряженностью $E = U/R$ (обозначено I на рис. 1, а и б).

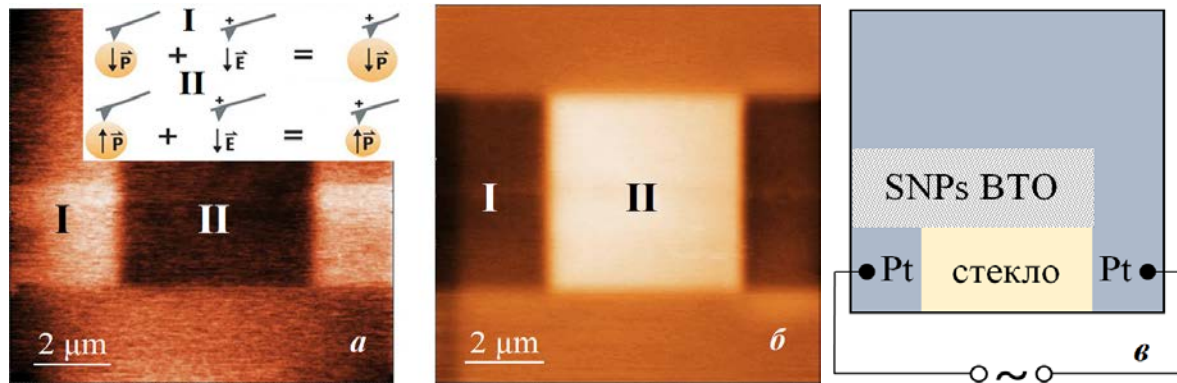


Рис. 1. Распределение поверхностного потенциала (CPD) при двукратной поляризации нанопленки из SNPs BTO: а – под напряжением -10 В; б – под напряжением $+10$ В [22]; в – схематичное изображение пленочного конденсатора Pt/SNPs BTO/Pt

Fig. 1. Distribution of the surface potential (CPD) at double polarization of the nanofilm from SNPs BTO: а – under a voltage of -10 V; б – under voltage $+10$ V [22]; в – schematic image of a Pt / SNPs BTO / Pt film capacitor

При подаче напряжения в схему «зонд – нанопленка из SNPs BTO» могут происходить как локальные расширения сегнетоэлектрических структур (СЭС) в ЛНП при $E \uparrow P$ (верхняя запись I на вставке к рис. 1, а), так и их сжатия (нижняя запись II на вставке к рис. 1, а). Таким образом происходит формирование сегнетоэлектрических доменов с направлением поляризации, задаваемым направлением E [20].

Нами также был изучен диэлектрический гистерезис в ЛНП из SNPs BTO. Фактически, была реализована схема пленочного плоского конденсатора, структура и схема подключения которого, предложенная в [21], иллюстрирует рисунок 1, в. Обкладками конденсатора служили магнетронные нанопленки из платины, нанесенные на установку для подготовки образцов типа Jeol JFC 1600. На обкладки конденсатора подавалось переменное напряжение с частотой 50 Гц и амплитудой 17 В.

Полученная таким образом зависимость носила явно нелинейный вид, характерный для гистерезиса, т. е. фактически имел место сегнетоэлектрический гистерезис. Важно отметить наличие на зависимости $P(E)$ остаточной поляризации P_{oc} при $E = 0$. Это свидетельствовало о возможности создания методом ЗК поляризованных областей на поверхности нанопленки из SNPs BTO со сколь угодно малыми размерами с помощью проводящего зонда кантилевера.

Результаты и их обсуждение

В спектре КРС (рис. 2) наблюдались линии, соответствующие тетрагональной (B1) и кубической (A1) структуре $BaTiO_3$. Были также обнаружены линии, вызванные поперечными (TO_1 , TO_2 , TO_4) и продольными (LO_1 , LO_3 , LO_4) оптическими колебаниями, что согласуется с данными из [23; 24]. В области выше 700 см^{-1} возбуждаются линии, отвечающие колебаниям олеата натрия – соединения, которыми стабилизировались SNPs BTO.

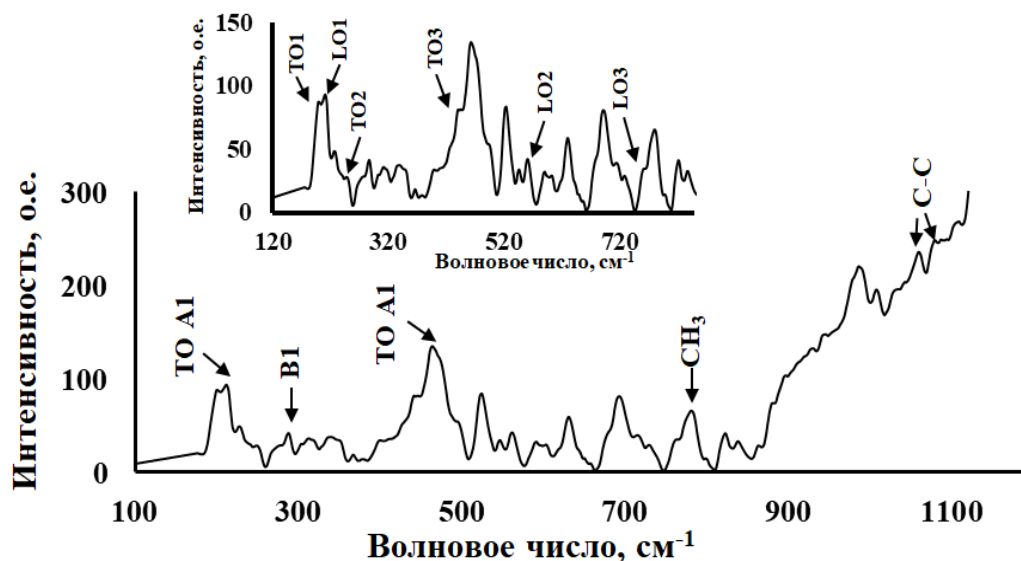


Рис. 2. Обзорный и детальный (на вставке) спектры КРС для пленки из SNPs BTO

Fig. 2. Overview and detailed (inset) Raman spectra for a film of SNPs BTO

Возникающая спонтанная поляризация в векторном виде может быть записана в виде выражения

$$\vec{P} = (\varepsilon(\omega) - 1)\varepsilon_0\vec{E}, \quad (2)$$

где $\varepsilon(\omega)$ – диэлектрическая проницаемость ($\varepsilon \gg 1$); ε_0 – диэлектрическая постоянная; $\vec{E}$ – среднее макроскопическое электрическое поле. Оценка ее величины в исследуемом пленочном сегнетоэлектрике составила 7 мКл/см².

По представленной на рисунке 3 характерной для подобных структур петле гистерезиса [25; 26] $P(E)$, помимо остаточной поляризации P_{oc} , важно отметить наличие полей коэрцитивности E_k , которые оказались несимметричными относительно $E = 0$ В и составили 624 и –1056 кВ/см. Таким образом, можно констатировать фактическое возникновение поля смещения E_{cm} (отмеченное на рисунке 3 пунктирной линией) величиной $E_{cm} = 216,5$ кВ/см.

На рисунке 1 представлено в качестве примера типичное распределение потенциала (Surface Potential Distribution – CPD), формируемого по описанной методике. При поляризации сканированием по методу ЗК на поверхности нанопленки из SNPs BTO были созданы области в форме квадрата с размерами 5×5 мкм под напряжением $U = -10$ В (рис. 1, а) и $U = 10$ В (рис. 1, б). После второго сканирования по методу ЗК при тех же напряжениях $U = \pm 10$ В этой же области с увеличенными размерами (10×10 мкм), которая обязательно включала уже созданную поляризованную область 5×5 мкм, отмечено появление высокого контраста. Таким образом, при поляризации методом ЗК под напряжением $U = -10$ В область сканирования затемнялась (рис. 1, а), тогда как при поляризации зондом под напряжением $U = +10$ В область сканирования освещалась (см. рис. 1, б).

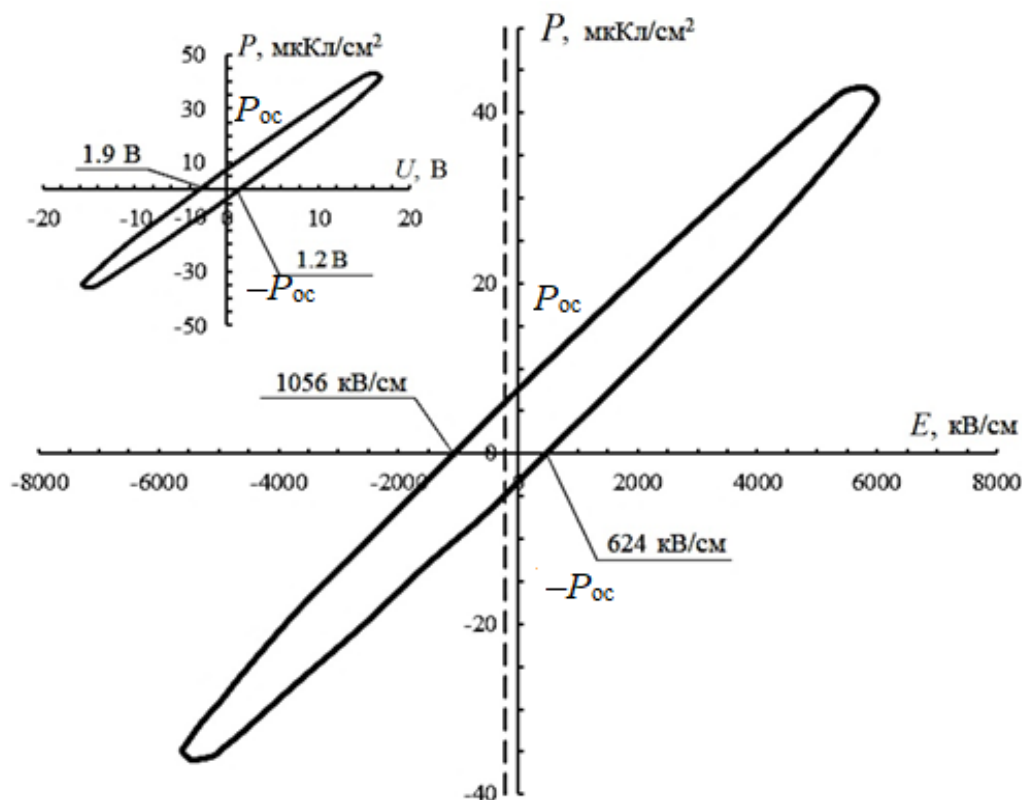


Рис. 3. Диэлектрический гистерезис $P(E)$ нанопленочного конденсатора Pt/ SNPs VTO /Pt (пунктирная линия – поле смещения). На вставке показана зависимость $P(U)$. В обоих случаях отмечены также значения коэрцитивностей

Fig. 3. Dielectric hysteresis $P(E)$ of the nanofilm capacitor Pt/ SNPs VTO /Pt (dashed line – displacement field). The inset shows the $P(U)$ dependence. In both cases, the coercivity values are also noted

Фактически, методом ЗК на поверхности нанопленки из SNPs VTO были созданы сегнетоэлектрические домены с размерами 5×5 мкм, обладающие взаимно противоположными направлениями вектора поляризации путем перераспределения поверхностного потенциала в поляризуемых областях.

По аналогичной методике ЗК в схеме «зонд – нанопленка SNPs VTO» создавалась поляризация в ЛНП (толщиной 84 нм) в области размером 7×7 мкм под действием электрического напряе-

ния $U = -7$ В была произведена поляризация. Полученная область имела размеры, аналогичные представленным на рисунке 4. Для учета влияния на получаемые изображения CPD (рис. 4, а) сформированы при наличии коэрцитивного поля E_k , величина которого равна 624 и -1056 кВ/см ($U_k = +1,2$ и $U_k = -1,9$ В) для ЛНП с толщиной 56 нм. Согласно [25; 26] на величину E_k и U_k влияет как толщина ЛНП, так и концентрация наносимой КС. Этот вывод подтверждается изображением CPD (рис. 4, а), содержа-

щим поляризованный квадрат, полученный без изменения режима ЗК с областью, переполаризованной во вложенном квадрате с размерами 2×2 мкм под напряжением противоположного знака и величиной $U = +10$ В. На получившемся изображении (рис. 4, а) отчетливо видно различие областей, поляризованных в разных направлениях, в виде квадратов с четкими границами. Это отражено и на профиле CPD-изображения вдоль выбранного направления (рис. 4, б) с переключением поляризации в данных областях. Следует отметить ее усиление в зависимости как от направления и величины напряжения поляризации ($U = +10$ и -7 В), так и от изменений E_k и U_k с ростом напряжения поляризации и толщины ЛНП.

Влияние материала подложки на величину поляризации изучено на ЛНП SNPs BTO с существенно большей толщиной 196 нм, которая согласно [27] должна обладать меньшей коэрцитивно-

стью E_k и U_k как диссипативного фактора, снижающего величину их сегнетоэлектрической поляризации. ЛНП SNPs BTO осаждались на подложках из стекла (Pt/стекло) и кремния (SERS) с наночастицами Ag. Материал подложек характеризовался разными типами проводимостей: диэлектрическая и полупроводниковая, а нанопленки на них имели металлическую проводимость, что создавало условия для резонансного усиления КРС. Напряжение и размеры областей поляризации задавались одинаковой величины: $U = -10$ В и 5×5 мкм соответственно. Характерные изображения распределений поверхностного потенциала поляризованной пленки SNPs BTO на подложках, с магнетронной пленкой из платины SNPs BTO/Pt на стекле представлены на рисунке 5, а и с наночастицами серебра на кремнии SNPs BTO/Ag – на рисунке 5, б. Цифрой I обозначена часть неполяризованной области, а II – поляризованная область с размерами 5×5 мкм.

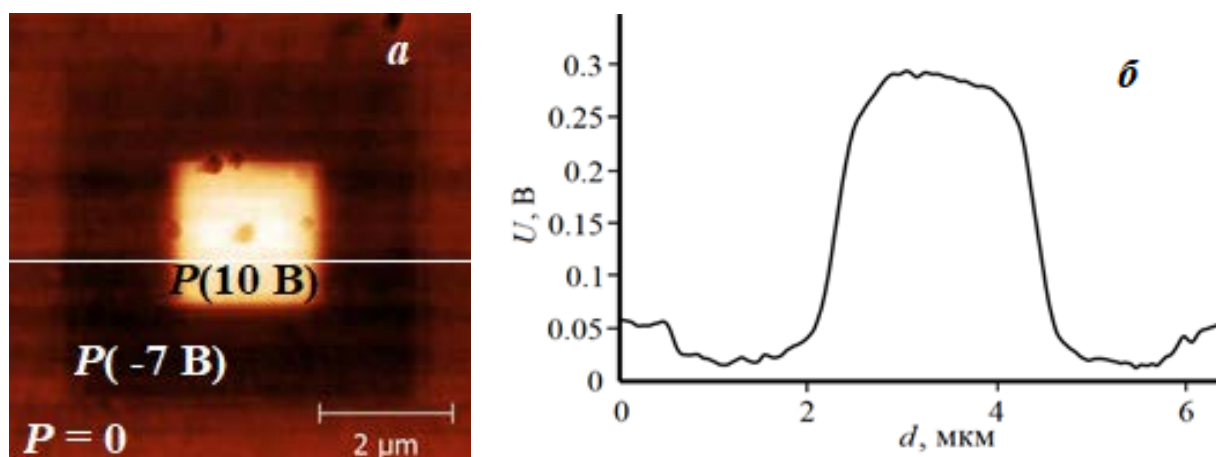


Рис. 4. Распределение поверхностного потенциала в ленгмюровской пленке из SNPs BTO, по данным ЗК (а); профиль поверхностного потенциала пленки SNPs BTO (б) [22]

Fig. 4. The distribution of the surface potential in the Langmuir film of SNPs BTO, according to the ZK data (a); profile of the surface potential of the BTO SNPs film (b) [22]

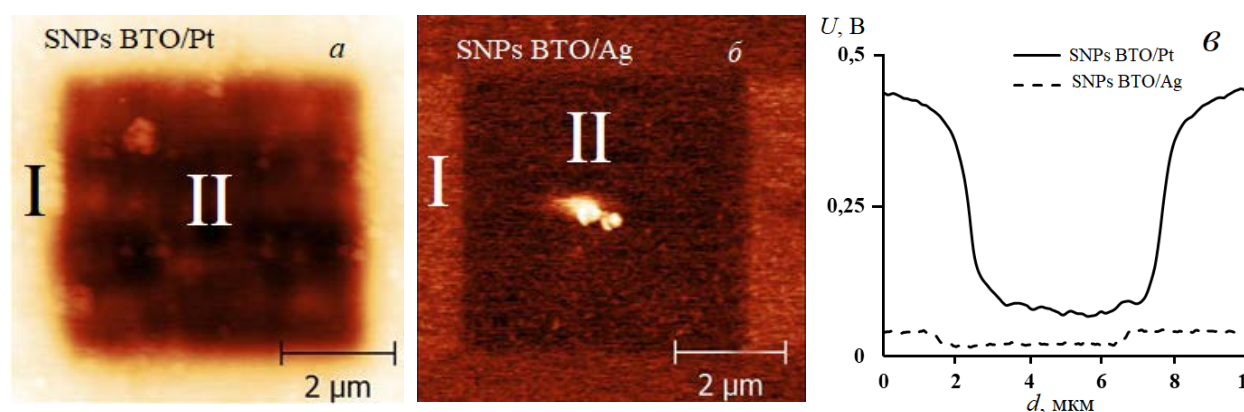


Рис. 5. Распределение поверхностного потенциала в ленгмюровской пленке из SNPs BTO на подложках из: а – Pt/стекло; б – SERS; в – профили поверхностного потенциала неполяризованных (I) и поляризованных (II) областей ЛНП SNPs BTO на различных подложках

Fig. 5. Distribution of the surface potential in the Langmuir film of SNPs BTO film on substrates from: а – Pt/glass; б – SERS; в – surface potential profiles of unpolarized (I) and polarized (II) regions of LNF SNPs BTO on different substrates

На рисунке 5, в представлены характерные профили, соответствующие распределениям поверхностного потенциала в каждой из этих ленгмюровских нанопленок по результатам анализа методом Кельвина. Уровень поляризации ЛНП SNPs BTO на платиновой подложке более чем в 17 раз превысил ее поляризацию на подложке SERS, составив 0,69 мкКл/см² и 0,04 мкКл/см² в абсолютных величинах. По представленному профилю была определена контрастность противоположно поляризованных областей. Ее величина относительно области без электрического воздействия для $U = -7$ В составила 50:1, а для $U = +10$ В – 600:1 соответственно.

По описанной выше методике методом ЗК на поверхности ЛНП из SNPs BTO с толщиной 84 нм была создана сеть из девяти квадратных элементов с размерами 3×3 мкм. Общая площадь

сканирования проводящим зондом кантилевера 15×15 мкм. В такой же последовательности формировалась аналогичная структура при изменении напряжения с шагом через 1 В, но отрицательными напряжениями от $U = -2$ и до $U = -10$ В. Структуры, создаваемые прикладываемым электрическим полем с напряженностью, эффективная величина которой $E = U/R - E_k$, в виде сегнетоэлектрических доменов в форме квадратов с размерами 3×3 мкм показаны на рисунке 6, а и б. Поляризованные области во всех случаях характеризовались как четкими границами созданных сегнетоэлектрических доменов, так и их достаточно однородной контрастностью. Сопоставление представленных наполяризованных элементов свидетельствовало о росте контрастности по мере увеличения напряжения вплоть до напряжений +7 и – 7 В, начиная с которых поляризация практически не изменялась.

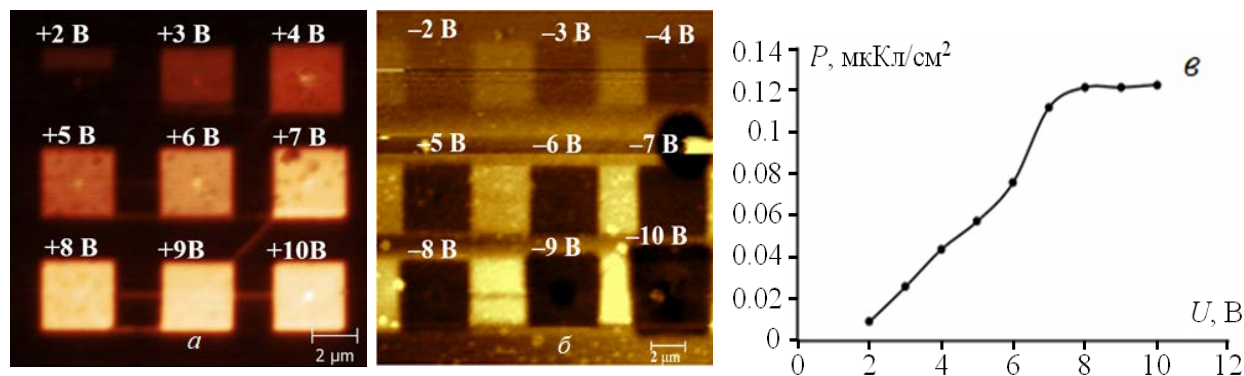


Рис. 6. Распределение поверхностного потенциала в ленгмюровской пленке из SNPs BTO с поляризованными областями под напряжением: *а* – положительной полярности; *б* – отрицательной полярности; *в* – зависимость величины остаточной поляризации от напряжения

Fig. 6. Distribution of the surface potential of the regions of the Langmuir film SNPs BTO, polarized by: *a* – voltage; *b* – negative polarity; *v* – the dependence of the residual polarization on the voltage

В основе расчета поляризации P согласно формуле (2) учтен радиус кантилевера $R = 30$ нм. Его величина определяет поверхностный заряд в ЛНП $Q = U/rt$ (здесь r отвечает сопротивлению области, в которой возникает заряд, а t – время нахождения зонда кантилевера над ней). Так как сила электростатического взаимодействия $F = qQ/4\pi\epsilon\epsilon_0 R$, то $E = F/q \sim k$, где q – переносимый заряд, а k – размерный коэффициент. Таким образом, выражение (2) при расчетах упрощалось: $P = E\epsilon(\omega) \sim Q/R^2$.

Значения расчетных P при задаваемых U представлены на рисунке 6, *в*. Фактически, за счет остаточной поляризации от напряжения (P_{oc} при $E = 0$ см, см. рис. 3) была произведена запись сегнетодоменов (см. рис. 6, *б*). В интервале напряжений от ± 2 В и до ± 7 В $P(U)$ зависимость имела линейный характер. При напряжении начиная с $U \sim \pm 8$ В зависимость $P(U)$ достигала насыщения для исследованной ленгмюровской пленки из SNPs BTO данной толщины $P_{oc} \sim 0,12$ мКл/см² (см. рис. 6, *в*). В ин-

тервале от ± 7 В и до ± 8 В поляризационная зависимость $P(U)$ приобретала нестационарный (скачкообразный) характер.

Выводы

1. Методом комбинационного (рамановского) рассеяния света возбуждены поперечные и продольные оптические фоновые колебания, характерные для SNPs BTO, в ленгмюровской нанопленке, нанесенной на SERS-подложки (Surface-Enhanced Raman Scattering).

2. По диэлектрическому гистерезису в ленгмюровской пленке SNPs BTO установлены значения коэрцитивных полей, остаточной поляризации и полей смещения.

3. Показано, что наибольшая контрастность ЗК-изображений сегнетоэлектрических доменов достигается в SNPs BTO на магнетронной платиновой нанопленке на стекле.

4. Реализована запись информационных бит при последовательном переключении с положительного к отрицательному напряжению.

Список литературы

1. Relaxation motion and possible memory of domain structures in barium titanate ceramics studied by mechanical and dielectric losses / B. L. Cheng, M. Gabbay, M. Maglione, G. Fantozzi // *Journal of Electroceramics*. 2003. Vol. 10, No. 1. P. 5–18.
2. Stoica L., Bygrave F., Andrew J. Barium titanate thin films for novel memory applications // *UPB Sci. Bull., Series A*. 2013. Vol. 75. P. 147–158.
3. Design strategy of barium titanate/polyvinylidene fluoride-based nanocomposite films for high energy storage / Yan Wang, Minggang Yao, Rong Ma [et al.] // *Journal of Materials Chemistry A*. 2020. Vol. 8. No. 3. P. 884–917.
4. Razi P. M., Angappane S., Gangineni R. B. Bipolar resistive switching studies in amorphous barium titanate thin films in Ag/am-BTO/ITO capacitor structures // *Materials Science and Engineering: B*. 2021. Vol. 263. P. 114852.
5. Write-once-read-many-times resistive switching behavior of amorphous barium titanate based device with very high on-off ratio and stability / A. K. Shringi, A. Betal, M. Kumar, S. Sahu // *Applied Physics Letters*. 2021. Vol. 118, No. 26. P. 263505.
6. Surface-initiated polymerization from barium titanate nanoparticles for hybrid dielectric capacitors / S. A. Paniagua, Yunsang Kim, K. E. Squires [et al.] // *ACS applied materials & interfaces*. 2014. Vol. 6, No. 5. P. 3477–3482.
7. Novel design of highly [110]-oriented barium titanate nanorod array and its application in nanocomposite capacitors / L. Yao, Z. Pan, J. Zhai, Haydn H. D. Chen // *Nanoscale*. 2017. Vol. 9, No. 12. P. 4255–4264.
8. Lead zirconate titanate and barium titanate bi-layer ferroelectric films on Si / Yingying Wang, Jingdan Yan, Hongbo Cheng [et al.] // *Ceramics International*. 2019. Vol. 45, No. 7. P. 9032–9037.
9. Barium titanate at the nanoscale: controlled synthesis and dielectric and ferroelectric properties / B. Jiang, J. Iocozzia, Lei Zhao [et al.] // *Chemical Society Reviews*. 2019. Vol. 48, No. 4. P. 1194–1228.
10. Microwave dielectric properties of graded barium strontium titanate films / M. W. Cole, C. Weiss, E. Ngo [et al.] // *Applied Physics Letters*. 2008. Vol. 92, No. 18. P. 182906.
11. Barium titanate flakes based composites for microwave absorbing applications / R. K. Jain, A. Dubey, A. Soni [et al.] // *Processing and Application of Ceramics*. 2013. Vol. 7, No. 4. P. 189–193.
12. Dielectric properties of Mn doped Bismuth Barium Titanate based ceramic thin films prepared by PLD technique / S. Mallick, A. Vorobiev, Z. Ahmad [et al.] // *Ceramics International*. 2017. Vol. 43, No. 12. P. 8778–8783.
13. Vu T. H., Phuong N. T. M., Nguyen T. Lead-free ferroelectric barium titanate-based thin film for tunable microwave device application // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1091, No. 1. P. 012060.

14. Tohma T., Masumoto H., Goto T. Microstructure and dielectric properties of barium titanate film prepared by MOCVD // *Materials Transactions*. 2002. Vol. 43, No. 11. P. 2880–2884.12,5

15. Chinchamalature V. R., Ghosh S., Chaudhari G. Synthesis and electrical characterization of BaTiO₃ thin films on Si (100) // *Mater. Sci. Appl.*, 2010. Vol. 1, No. 4. P. 187.

16. Structural and electrical properties of barium titanate (BaTiO) thin films obtained by spray pyrolysis method / S. S. Kumbhar, M. Mahadik, P. Chougule [et al.] // *Materials Science Poland*. 2015. Vol. 33, No. 4. P. 852–861.

17. Preferentially oriented BaTiO₃ thin films deposited on silicon with thin intermediate buffer layers / J. P. George, J. Beeckman, W. Woestenborghs [et al.] // *Nanoscale research letters*. 2013. Vol. 8, No. 1. P. 1–7.

18. Кузьменко А. П., Чухаева И. В., Абакумов П. В. Особенности формирования и структуры ленгмюровских пленок титаната бария // *Журнал технической физики*. 2019. Т. 89, вып. 8. С. 1244–1253.

19. Акципетров О. А. Гигантские нелинейно-оптические явления на поверхности металлов // *Соросовский образовательный журнал*. 2001. № 7, вып. 7. С. 109–116.

20. Титков А. Н., Анкудинов А. В. Атомно-силовая микроскопия поляризационных доменов в сегнетоэлектрических пленках // *Физика твердого тела*. 2005. № 47, вып. 6. С. 1110–1117.

21. Characterization of barium titanate ceramic powders by raman spectroscopy / Z. Lazarevich, N. Romceovich, M. Vijatovich [et al.] // *Acta Physica Polonica A*. No. 115(4). 2009. P. 808–810.

22. Piezoelectric properties of barium titanate langmuir films / A. P. Kuzmenko, I. V. Chuhaeva, P. V. Abakumov, M. B. Dobromyslov // *Journal of Nano- and Electronic Physics*. 2016. Vol. 8. P. 04043-1–04043-2.

23. Nakamura T., Ebina T., Hayashi H. In-situ Raman spectroscopy of BaTiO₃ particles for tetragonal–cubic transform // *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 2013. Vol. 74. P. 957–962.

24. Rh:BaTiO₃ thin films with large nonlinear optical properties / H. Wang, G. Tan, A. Jiang, Y. Zhou, Zh. Ch. G. Yang // *Applied Optics*. 2002. Vol. 41, is. 9. P. 1729–1732.

25. Чухаева И. В., Абакумов П. В., Кузьменко А. П. Структура и диэлектрические свойства монослоев BaTiO₃ // *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2014. № 5 (56). С. 46–49.

26. Ржанов А. В. Титанат бария – новый сегнетоэлектрик // *Успехи физических наук*. 1949. № 38, вып. 4. С. 461–489.

27. Nanoscale polarization manipulation and imaging of ferroelectric Langmuir-Blodgett polymer films / B. J. Rodriguez, S. Jesse, S. Kalinin [et al.] // *Applied physics letters*. 2007. Vol. 90, No. 12. P. 122904.

References

1. Cheng B. L., Gabbay M., Maglione M., Fantozzi G. Relaxation motion and possible memory of domain structures in barium titanate ceramics studied by mechanical and dielectric losses. *Journal of Electroceramics*, 2003, vol. 10, no. 1, pp. 5–18.
2. Stoica L., Bygrave F., Andrew J. Barium titanate thin films for novel memory applications. *UPB Sci. Bull. Series A*, 2013, vol. 75, pp. 147–158.
3. Yan Wang, Minggang Yao, Rong Ma. Design strategy of barium titanate/polyvinylidene fluoride-based nanocomposite films for high energy storage. *Journal of Materials Chemistry A*, 2020, vol. 8, no. 3, pp. 884–917.
4. Razi P. M., Angappane S., Gangineni R. B. Bipolar resistive switching studies in amorphous barium titanate thin films in Ag/am-BTO/ITO capacitor structures. *Materials Science and Engineering: B*, 2021, vol. 263, pp. 114852.
5. Shringi A. K., Betal A., Kumar M., Sahu S. Write-once-read-many-times resistive switching behavior of amorphous barium titanate based device with very high on-off ratio and stability. *Applied Physics Letters*, 2021, vol. 118, no. 26, p. 263505.
6. Paniagua S. A., Yunsang Kim, Squires K. E., eds. Surface-initiated polymerization from barium titanate nanoparticles for hybrid dielectric capacitors. *ACS applied materials & interfaces*, 2014, vol. 6, no. 5, pp. 3477–3482.
7. Yao L., Pan Z., Zhai J., Haydn H. D. Chen. Novel design of highly [110]-oriented barium titanate nanorod array and its application in nanocomposite capacitors. *Nanoscale*, 2017, vol. 9, no. 12, pp. 4255–4264.
8. Yingying Wang, Jingdan Yan, Hongbo Cheng, eds. Lead zirconate titanate and barium titanate bi-layer ferroelectric films on Si. *Ceramics International*, 2019, vol. 45, no. 7, pp. 9032–9037.
9. Jiang B., Iocozzia J., Lei Zhao, eds. Barium titanate at the nanoscale: controlled synthesis and dielectric and ferroelectric properties. *Chemical Society Reviews*, 2019, vol. 48, no. 4, pp. 1194–1228.
10. Cole M. W., Weiss C., Ngo E., eds. Microwave dielectric properties of graded barium strontium titanate films. *Applied Physics Letters*, 2008, vol. 92, no. 18, p. 182906.
11. Jain R. K., Dubey A., Soni A., eds. Barium titanate flakes based composites for microwave absorbing applications. *Processing and Application of Ceramics*, 2013, vol. 7, no. 4, pp. 189–193.
12. Mallick S., Vorobiev A., Ahmad Z., eds. Dielectric properties of Mn doped Bismuth Barium Titanate based ceramic thin films prepared by PLD technique. *Ceramics International*, 2017, vol. 43, no. 12, pp. 8778–8783.
13. Vu T. H., Phuong N. T. M., Nguyen T. Lead-free ferroelectric barium titanate-based thin film for tunable microwave device application. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2021, vol. 1091, no. 1, p. 012060.

14. Tohma T., Masumoto H., Goto T. Microstructure and dielectric properties of barium titanate film prepared by MOCVD. *Materials Transactions*, 2002, vol. 43, no. 11, pp. 2880–2884.
15. Chinchamalature V. R., Ghosh S., Chaudhari G. Synthesis and electrical characterization of BaTiO₃ thin films on Si (100). *Mater. Sci. Appl.*, 2010, vol. 1, no. 4, p. 187.
16. Kumbhar S. S., Mahadik M., Chougule, eds. Structural and electrical properties of barium titanate (BaTiO) thin films obtained by spray pyrolysis method. *Materials Science Poland*, 2015, vol. 33, no. 4, pp. 852–861.
17. George J. P., Beeckman J., Woestenborghs W., eds. Preferentially oriented BaTiO₃ thin films deposited on silicon with thin intermediate buffer layers. *Nanoscale research letters*, 2013, vol. 8, no. 1, pp. 1–7.
18. Kuzmenko A. P., Chukhaeva I. V., Abakumov P. V. Osobennosti formirovaniya i struktury lengmyurovskikh plenok titanata bariya [Features of the formation and structure of barium titanate Langmuir films]. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki = Journal of Applied Physics*, 2019, vol. 89, no. 8, pp. 1244–1253.
19. Aktsipetrov O. A. Gigantskie nelineino-opticheskie yavleniya na poverkhnosti metallov [Giant nonlinear optical phenomena on the surface of metals]. *Sorosovskii obrazovatel'nyi zhurnal = Soros Educational Journal*, 2001, no. 7, is. 7, pp. 109–116.
20. Titkov A. N., Ankudinov A. V. Atomno-silovaya mikroskopiya polarizatsionnykh domenov v segnetoelektricheskikh plenках [Atomic force microscopy of polarization domains in ferroelectric films]. *Fizika tverdogo tela = Solid State Physics*, 2005, vol. 47, no. 6, pp. 1110–1117.
21. Lazarevich Z., Romcevic N., Vijatovich M. Characterization of Barium Titanate ceramic powders by Raman Spectroscopy. *Acta Physica Polonica A*, 2009, no. 115, pp. 808–810.
22. Kuzmenko A. P., Chuhaeva I. V., Abakumov P. V., Dobromyslov M. B. Piezoelectric properties of barium titanate langmuir films. *Journal of nano- and electronic physics*, 2016, vol. 8, pp. 04043-1–04043-2.
23. Nakamura T., Ebina T., Hayashi H. In-situ Raman spectroscopy of BaTiO₃ particles for tetragonal–cubic transform. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 2013, vol. 74, pp. 957–962.
24. Wang H., Tan G., Jiang A., Zhou Y., Yang Zh. Ch. G. Rh:BaTiO₃ thin films with large nonlinear optical properties. *Applied Optics*, 2002, vol. 41, is. 9, pp. 1729–1732.
25. Chukhaeva I. V., Abakumov P. V., Kuzmenko A. P. Structure and dielectric properties of BaTiO₃ monolayers. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2014, no. 5 (56), pp. 46–49.

26. Rzhhanov A. V. Titanat bariya – novyi segnetoelektrik [Barium titanate is a new ferroelectric]. *Uspekhi fizicheskikh nauk = Advances in the physical sciences*, 1949, no. 38, is. 4, pp. 461–489.

27. Rodriguez B. J., Jesse S., Kalinin S., eds. Nanoscale polarization manipulation and imaging of ferroelectric Langmuir-Blodgett polymer films. *Applied physics letters*, 2007, vol. 90, no. 12, p. 122904.

Информация об авторах / Information about the Authors

Кузьменко Александр Павлович, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Регионального центра нанотехнологий, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: apk3527@mail.ru, ORCID: 0000-0001-7089-0692

Alexander P. Kuzmenko, Dr. of Sci. (Physics and Mathematics), Professor, Chief Researcher of the Regional Center for Nanotechnology, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: apk3527@mail.ru, ORCID: 0000-0001-7089-0692

Локтионова Инна Владимировна, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Регионального центра нанотехнологий, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: apk3527@mail.ru

Inna V. Loktionova, Cand. of Sci. (Physics and Mathematics), Senior Researcher of the Regional Center for Nanotechnology, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: ms.chuhaeva@mail.ru

Абакумов Павел Владимирович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Регионального центра нанотехнологий, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: abakumovpavel18@gmail.com

Pavel V. Abakumov, Cand. of Sci. (Physics and Mathematics), Senior Researcher of the Regional Center for Nanotechnology, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: abakumovpavel18@gmail.com

Новиков Евгений Александрович, младший научный сотрудник Регионального центра нанотехнологий, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: novikov.2403@mail.ru, ORCID: 0000-0002-8824-1540

Evgeny A. Novikov, Junior Researcher of the Regional Center for Nanotechnology, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: novikov.2403@mail.ru, ORCID: 0000-0002-8824-1540

Сизов Александр Семёнович, доктор физико-математических наук, профессор, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: sizov@mail.ru

Alexander S. Sizov, Dr. of Sci. (Physics and Mathematics), Professor, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: sizov@mail.ru

Кузько Анна Витальевна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры нанотехнологий, общей и прикладной физики, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: avkuzko@mail.ru

Anna V. Kuzko, Dr. of Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor of the Department of Nanotechnology, General and Applied Physics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: avkuzko@mail.ru