

МОРФОЛОГИЯ ПОВЕРХНОСТИ, ОПТИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОК $\text{La}_{0.44}\text{Ba}_{0.56}\text{CoO}_3$

Н.А. Босак¹⁾, А.Н. Чумаков¹⁾, М.В. Бушинский²⁾, Г.М. Чобот³⁾, Л.В. Баран⁴⁾,
А.А. Шевченко^{3), 5)}, В.В. Малутина-Бронская⁶⁾, А.А. Иванов¹⁾

¹⁾ИНСТИТУТ ФИЗИКИ им. Б.И. Степанова НАН Беларуси,
пр. Независимости 68-2, 220072 Минск, Беларусь, n.bosak@ifanbel.bas-net.by

²⁾Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению,
ул. Петруся Бровки 19, 220072 Минск, Беларусь, bushinsky@physics.by

³⁾Белорусский государственный аграрный технический университет,
пр. Независимости 99, 220023 Минск, Беларусь

⁴⁾Белорусский государственный университет,
пр. Независимости 4, 220030 Минск, Беларусь, baran@bsu.by

⁵⁾Белорусский национальный технический университет,
пр. Независимости 65, 220013 Минск, Беларусь, alexshev56@mail.ru

⁶⁾ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»,
пр. Независимости 68, 220072 Минск, Беларусь, malyutina@oelt.basnet.by

Проведены исследования тонких пленок $\text{La}_{0.44}\text{Ba}_{0.56}\text{CoO}_3$, осажденных в вакууме ($p = 2 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст.) на кремниевую подложку при многоимпульсном высокочастотном ($f \sim 10\text{--}15$ кГц) лазерном воздействии на керамическую мишень, легированную лантаном с барием, при плотности мощности лазерного излучения $q = 54$ МВт/см². Изучена морфология полученных пленок с помощью атомно-силовой микроскопии, выявлены особенности спектров пропускания, представлены результаты исследования их электрофизических характеристик.

Ключевые слова: высокочастотное лазерное воздействие; пассивный затвор; структура тонких пленок; спектры пропускания и отражения; вольт-амперные и вольт-фарадные характеристики.

SURFACE MORPHOLOGY, OPTICAL AND ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF $\text{La}_{0.44}\text{Ba}_{0.56}\text{CoO}_3$ FILMS

N.A. Bosak¹⁾, A.N. Chumakov¹⁾, M.V. Bushinsky²⁾, G.M. Chobot³⁾, L.V. Baran⁴⁾,
A.A. Shevchenok^{3), 5)}, V.V. Malutina-Bronskaya⁶⁾, A.A. Ivanov¹⁾

¹⁾B.I. Stepanov Institute of Physics, National Academy of Sciences of Belarus,
68-2 Nezavisimosti Ave., 220072 Minsk, Belarus, n.bosak@ifanbel.bas-net.by

²⁾GO «SPC NAS of Belarus for Materials Science»,
19 Petrusya Brovki Str., 220072 Minsk, Belarus, bushinsky@physics.by

³⁾Belarusian State Agrarian Technical University,
99 Nezavisimosti Ave., 220023 Minsk, Belarus

⁴⁾Belarusian State University, 4 Nezavisimosti Ave., 220030 Minsk, Belarus, baran@bsu.by

⁵⁾Belarusian National Technical University,
65 Nezavisimosti Ave., 220013 Minsk, Belarus, alexshev56@mail.ru

⁶⁾SSPA «Optics, Optoelectronics and Laser Technology»,
National Academy of Sciences of Belarus,
68 Nezavisimosti Ave., 220072 Minsk, Belarus, v_malyutina@rambler.ru

The properties of $\text{La}_{0.44}\text{Ba}_{0.56}\text{CoO}_3$ thin films deposited in vacuum ($p = 2 \cdot 10^{-2}$ mm Hg) on a silicon substrate by way of a multi-pulse high-frequency ($f \sim 10\text{--}15$ kHz) laser action on a ceramic target doped with lanthanum and barium were studied at a laser power density of $q = 54$ MW/cm². The morphology of the obtained films was studied using atomic force microscopy. The features of the transmission spectra of the films were identified and their electrophysical characteristics specified.

Keywords: high-frequency laser effect; passive shutter; the structure of thin films; transmission and reflections spectra, current-voltage and farad-voltage characteristics.

Введение

Оксиды на основе кобальта привлекают большое внимание ученых благодаря своим уникальным магнитным, электрическим транспортным и оптическим свойствам, поэтому могут быть использованы для разработки различных новых концептуальных устройств, таких как твердотельные топливные элементы, датчики газа и другие. В работе [1] исследовались магнитные свойства тонкой пленки LaCoO_3 на кремнии, полученной методом молекулярно-лучевой эпитаксии, а также проведен рентгеноструктурный анализ. Авторами [2] методом лазерного осаждения в вакууме получены тонкие пленки LaCoO_3 и исследованы их морфологические и рентгеноструктурные характеристики. Для практического применения интерес представляют двойные кобальтаты со структурой перовскита, полученные в виде тонких пленок [3].

Целью работы является формирование наноструктурированных тонких пленок состава $\text{La}_{0.44}\text{Ba}_{0.56}\text{CoO}_3$ на кремниевой подложке при многоимпульсном высокочастотном лазерном воздействии на мишень [4], изучение морфологии полученных тонких пленок с помощью атомно-силовой микроскопии, выявление особенностей спектров пропускания в ближней и средней ИК-области, отражения в видимой и ближней ИК-области, исследование вольт-амперных (ВАХ) и вольт-фарадных (ВФХ) характеристик.

Материалы и методы исследования

Пленки $\text{La}_{0.44}\text{Ba}_{0.56}\text{CoO}_3$ осаждались методом высокочастотного лазерного распыления оксидной керамики в вакууме ($p = 2.2$ Па). Экспериментальная лазерная установка ($\lambda = 1.06$ мкм) с регулируемой частотой повторения лазерных импульсов от 5 до 50 кГц содержала: источник лазерного излучения, оптическую систему транспортировки лазерного излучения к распыляемой мишени, вакуумную камеру

и измерительно-диагностический модуль. Частота повторения лазерных импульсов изменялась за счет варьирования уровня накачки лазера и оптической плотности затвора из радиационно облученного кристаллического фторида лития LiF с F_2^- -центрами окраски; длительность лазерных импульсов на полувысоте составляла $\tau \sim 85$ нс. Осаждение макроскопически однородных тонких пленок достигалось при плотности мощности лазерного излучения $q = 54$ МВт/см² и частоте повторения импульсов $f \sim 8-10$ кГц.

Морфология поверхности образцов исследовалась с помощью сканирующего зондового микроскопа Solver P47-Pro (НТ-МДТ, Россия) в полуконтактном режиме. Пропускание оптического излучения тонкими пленками в ближнем инфракрасном (ИК) диапазоне спектра измерялось на спектрофотометре Carry 500 Scan. Спектры пропускания в средней инфракрасной области регистрировались с помощью ИК-Фурье-спектрометра NEXUS (Thermo Nicolet) в диапазоне 400-4000 см⁻¹. Измерения ВАХ и ВФХ проводились с помощью автоматизированного измерителя иммитанса E7-20 при комнатной температуре. ВФХ измеряли на частоте сигнала 100 кГц, 500 кГц и 1 МГц.

Результаты и их обсуждение

Методом атомно-силовой микроскопии установлено, что при осаждении на кремниевую подложку формируется нанокристаллическая структура тонких пленок $\text{La}_{0.44}\text{Ba}_{0.56}\text{CoO}_3$ (рис. 1а). Средний латеральный размер структурных элементов составляет 60 нм. На поверхности наблюдается незначительное количество крупных частиц с латеральным размером 300-700 нм и высотой 60-120 нм (рис. 1б, в), однако, при этом средняя высота рельефа пленок, определенная в пяти разных точках образца при сканировании области размером 10x10 мкм, не превышает 17 нм,

а среднеарифметическая шероховатость 4 нм.

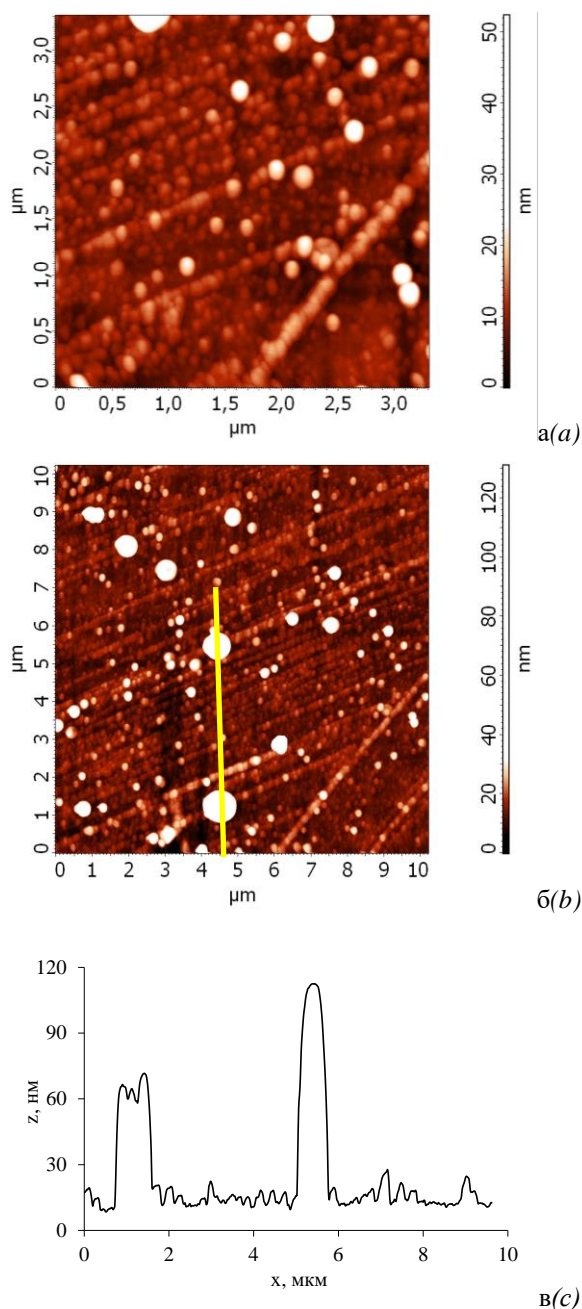


Рис. 1. Морфология поверхности (а, б) и профиль сечения (в) вдоль выделенной линии лазерно-осажденной тонкой пленки $\text{La}_{0.44}\text{Ba}_{0.56}\text{CoO}_3$ на кремниевой подложке

Fig. 1. Surface morphology (a, b) and cross-sectional profile (c) along a selected line of a laser-deposited thin film of $\text{La}_{0.44}\text{Ba}_{0.56}\text{CoO}_3$ on a silicon substrate

Пропускание лазерно-осажденной пленки $\text{La}_{0.44}\text{Ba}_{0.56}\text{CoO}_3$ на кремнии в ближней ИК-области спектра (рис. 2а) спадает от $T = 3.1\%$ на длине волны $\lambda = 1214$ нм до величины пропускания $T =$

2.5% на длине волны $\lambda = 2400$ нм. Коэффициент отражения R пленки $\text{La}_{0.44}\text{Ba}_{0.56}\text{CoO}_3$ (рис. 2б) уменьшается в области от $\lambda = 288$ нм до $\lambda = 495$ нм, достигая минимального значения $R_{\text{мин}} = 0.31\%$. Плавный рост коэффициента отражения начинается с $\lambda = 510$ нм и достигает максимума $R_{\text{макс}} = 20.5\%$ на длине волны $\lambda = 1100$ нм.

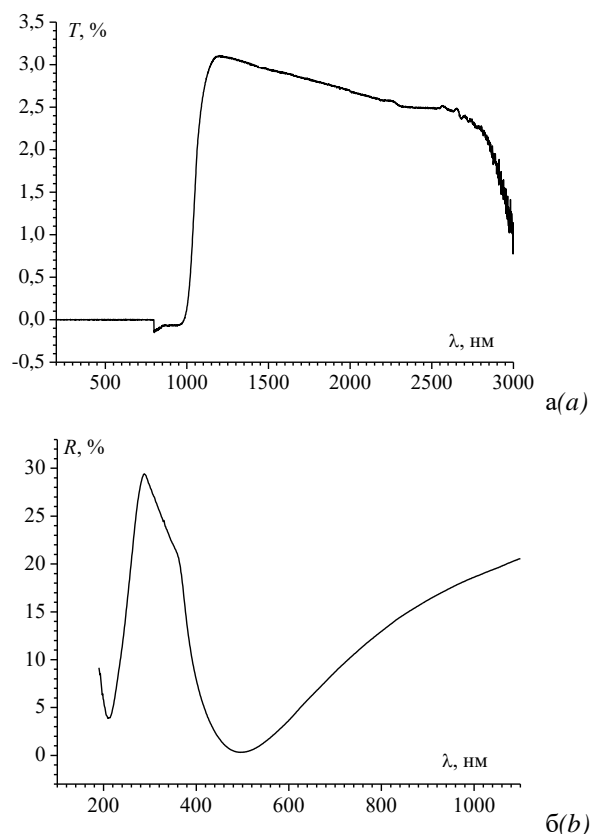


Рис. 2. Спектры пропускания (а) и отражения (б) лазерно-осажденной пленки $\text{La}_{0.44}\text{Ba}_{0.56}\text{CoO}_3$ на кремниевой подложке в ближней ИК-области и в видимой и ближней ИК-области соответственно Fig. 2. Transmission (a) and reflection (b) spectra of a laser-deposited $\text{La}_{0.44}\text{Ba}_{0.56}\text{CoO}_3$ film on a silicon substrate in the near IR region and in the visible and near IR regions, respectively

На рис. 3 представлены вольт-амперная (а) и вольт-фарадная (б) характеристики тонкой пленки $\text{La}_{0.44}\text{Ba}_{0.56}\text{CoO}_3$ на Si. При положительном потенциале, прикладываемом к пленке, величина протекающего тока оказалась ниже предела измерения прибора и на рисунке не показана. При отрицательном потенциале, прикладываемом к пленке, на ВАХ (рис. 3а) можно

выделить два участка, которые описываются степенной зависимостью тока от напряжения (характерно для тока, ограниченным пространственным зарядом (ТОПЗ) в пленке окисла с глубокими ловушками): $I \sim U^m$; $J \sim U^m$, где $m=1.83$ от -1 В до -6 В и $m=2.6$ от -6 В до -16 В. ВФХ исследуемой системы имеет вид, характерный для МОП-структуры, причем с частотой переменного напряжения емкость диэлектрика, в области отрицательных напряжений, и емкость всей структуры не меняются. Это связано с тем, что при достаточно высоких частотах переменного напряжения процесс накопления неосновных носителей заряда не успевает за изменением напряжения.

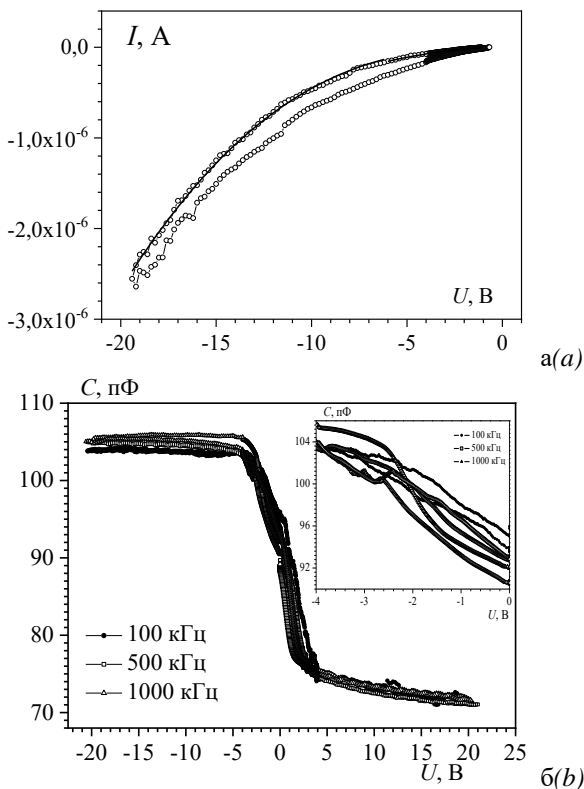


Рис. 3. Вольт-амперная (а) и вольт-фарадная (б) характеристики тонкой пленки $\text{La}_{0.44}\text{Ba}_{0.56}\text{CoO}_3$ на кремнии

Fig. 3. Current-voltage (a) and capacitance-voltage (b) characteristics of a thin film of $\text{La}_{0.44}\text{Ba}_{0.56}\text{CoO}_3$ on silicon

Как видно на вставке рис. 3б в области модуляции емкости от 0 В до -4 В наблюдаются максимумы и в зависимости от частоты сигнала они имеют разную ам-

плитуду. Положение максимумов относительно напряжения смещения тоже различно, что говорит о том, что вклад в емкость при разных частотах вносят моноэнергетические поверхностные состояния (глубокие ловушки) с разным уровнем залегания в запрещенной зоне. Данные поверхностные состояния обусловлены кристаллической структурой пленки окисла и границей раздела $\text{La}_{0.44}\text{Ba}_{0.56}\text{CoO}_3/\text{Si}$.

Заключение

Методом высокочастотного лазерного распыления получены нанокристаллические пленки $\text{La}_{0.44}\text{Ba}_{0.56}\text{CoO}_3$ на кремнии со средним латеральным размером структурных элементов 60 нм и среднеарифметической шероховатостью 4 нм. Пропускание пленки $\text{La}_{0.44}\text{Ba}_{0.56}\text{CoO}_3$ в ближней ИК-области спектра падает от 3.1% на длине волны 1214 нм до 2.5% на длине волны 2400 нм. Коэффициент отражения пленки уменьшается в области от $\lambda = 288$ нм до $\lambda = 495$ нм, достигая минимального значения 0.31%. Электрические свойства исследуемой пленки на кремнии показали наличие моноэнергетических поверхностных состояний с разным уровнем залегания в запрещенной зоне. Данные поверхностные состояния обусловлены кристаллической структурой пленки окисла и границей раздела $\text{La}_{0.44}\text{Ba}_{0.56}\text{CoO}_3/\text{Si}$.

Библиографические ссылки/ References

1. Posadas A., Berg M., Seo H., de Lozanne A., Demkov A. A., Smith D. et al. Epitaxial integration of ferromagnetic correlated oxide LaCoO_3 with Si (100). *Applied physics letters* 2011; 98, 053104.
2. Jedrusik M., Cieniek L., Kopia A., Turquat Ch., Leroux Ch. Structural characterization of LaCoO_3 thin films grown by pulsed laser deposition. *Archives of Metallurgy & Materials* 2020; 65(2): 793-797.
3. Liu M., Ren S.P., Zhang R.Y., Xue Z.Y., Ma C.R., Yin M.L. et al. Gas Sensing Properties of Epitaxial $\text{LaBaCo}_2\text{O}_{5.5+\delta}$ *Thin Films*. *Scientific Reports* 2015; 5. № 10784.
4. Min'ko L.Ya., Chumakov A.N., Bosak N.A. Efficient surface-erosion plasma formation in air due to the action of pulse-periodic laser radiation. *Soviet Journal of Quantum Electronics* 1990; 20(11): 1389-1392.