

УДК 621.373.826:533.9+537.9

**МОРФОЛОГИЯ ПОВЕРХНОСТИ, ОПТИЧЕСКИЕ
И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОК
ОКСИДА ЛАНТАНА, ЛЕГИРОВАННОГО ЭРБИЕМ**

**Н. А. Босак¹, Л. В. Баран², В. В. Малютина-Бронская³,
Е. М. Дятлова⁴, А. А. Шевченко⁵,
А. В. Бука⁴, А. С. Кузьмицкая³**

¹Институт физики имени Б. И. Степанова

НАН Беларуси, г. Минск

²Белорусский государственный университет, г. Минск

³ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»,
г. Минск, Беларусь

⁴Белорусский государственный технологический
университет, г. Минск

⁵Белорусский государственный аграрный технический
университет, г. Минск

Введение. В настоящее время материалы на основе перовскита приобретают огромную популярность в области материаловедения благодаря своим исключительным оптическим, электромагнитным свойствам. В работе [1] неорганический перовскит CaMnO_3 был предложен в качестве замены TiO_2 в электрон-транспортных слоях солнечных элементов. Из-за подходящей ширины запрещенной зоны, связанной с поглощением солнечного света, исследовались перовскит CaMnO_3 и подобные манганитные перовскиты, где Ca заменен Sr, Ba или La в качестве поглощающего слоя в неорганических перовскитовых солнечных элементах для оценки их потенциальной роли поглощающего слоя. Такие

материалы имеют ширину запрещенной зоны 1,1–1,5 эВ, в зависимости от соединения, и коэффициенты поглощения порядка 10^5 см^{-1} в видимой части спектра.

В нашей работе представлены результаты исследования структурных, оптических и электрических свойств тонких пленок оксида лантана, легированных эрбием и осажденных в вакууме на кремниевую подложку при многоимпульсном высокочастотном лазерном воздействии [2].

Экспериментальная установка. Пленки оксида лантана $\text{LaMn}_4\text{O}_3 + 0,5\%\text{Er}_2\text{O}_3$, легированных эрбием, осаждались методом высокочастотного лазерного распыления керамических мишеней в вакууме ($p = 3 \text{ Па}$). Экспериментальная лазерная установка ($\lambda = 1,06 \text{ мкм}$) 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 $\tau \sim 85 \text{ нс}$. Осаждение макроскопически однородных тонких пленок достигалось при плотности мощности лазерного излучения $q = 81 \text{ МВт/см}^2$ и частоте повторения импульсов $f \sim 12\text{--}15 \text{ кГц}$.

Для получения тонких пленок использовалась специально синтезированная мишень на основе модифицированного манганита лантана (ион-модификатор – Er^{3+}), изготовленная методом двухступенчатого формования и последующего высокотемпературного спекания. Для синтеза модифицированного манганита лантана применялись оксиды

квалификации «ХЧ»: оксид лантана, оксид марганца (III) и оксид эрбия. Получение модифицированного манганита лантана заключалось в совместном смешивании и измельчении в стехиометричном соотношении исходных компонентов в вибрационной мельнице, затем полученная смесь обжигалась в электрической печи при температуре 1300 °С с выдержкой при максимальной температуре 2 ч. Формование образцов проводилось на гидравлическом прессе. Давление прессования составляло 50 МПа. После формования образцы направлялись на повторный обжиг для спекания и получения механической прочности.

Морфология поверхности образцов исследовалась с помощью сканирующего зондового микроскопа NEXТ II (НТ-МДТ, Россия) в полуконтактном режиме. Пропускание оптического излучения тонкими пленками в ближнем инфракрасном (ИК) диапазоне спектра измерялось на спектрофотометре Cary 500 Scan. Спектры пропускания в средней инфракрасной области регистрировались с помощью ИК-Фурье-спектрометра NEXUS (Thermo Nicolet) в диапазоне 400–4000 см⁻¹. Измерение вольт-амперных характеристик (ВАХ) структур LaMn₄O₃ + 0,5%Er₂O₃/Si на кремниевой подложке проводилось с помощью автоматизированного базового лазерного испытательного комплекса с мультиспектральным источником лазерного излучения (набор лазерных диодов с длинами волн 405, 450, 520, 660, 780, 808, 905, 980 и 1064 нм) с общим оптоволоконным выводом и калиброванной мощностью излучения порядка 2 мВт. Все измерения были выполнены при комнатной температуре.

Экспериментальные результаты и их анализ. Методом атомно-силовой микроскопии установлена нанокристаллическая структура тонких пленок оксида лантана, легированных эрбием, на кремниевой подложке (рис. 1): средняя высота

рельефа поверхности пленок составляет 37 нм при средне-квадратичной шероховатости 15 нм. На поверхности пленок наблюдается значительное количество образований в виде капель разного диаметра (0,2–2,3 мкм) высотой до 120 нм (рис. 1, *в*), при этом средняя шероховатость пленок без учета капельной фазы составляет 3 нм. Средняя высота рельефа поверхности пленок на стеклянной подложке меньше, чем на кремниевой, почти в 2 раза (19 нм) (рис. 2, *а, б*), при этом капельная фаза на поверхности также присутствует, но латеральный размер капель меньше (0,15–1,2 мкм) (рис. 2, *в*).

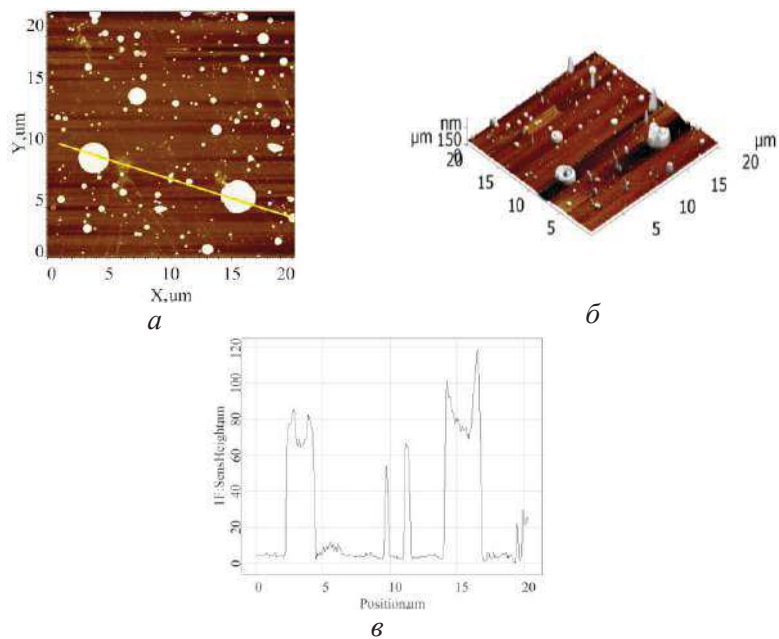


Рис. 1. АСМ-изображения поверхности лазерно-осажденной пленки оксида лантана, легированной эрбием, на кремнии (*а, б*) и профиль сечения рельефа поверхности пленок вдоль выделенной линии (*в*)

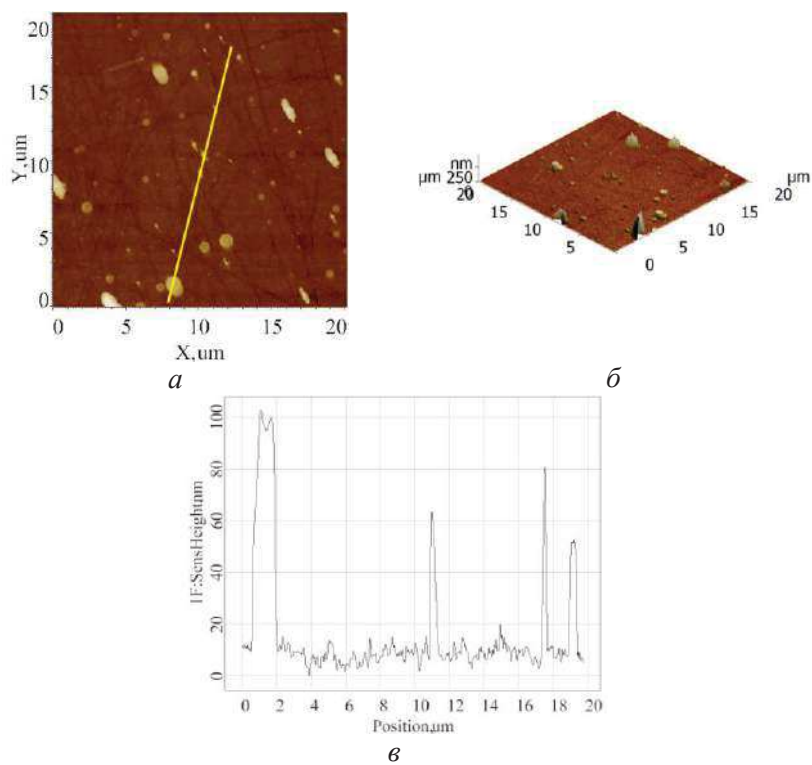


Рис. 2. АСМ-изображения поверхности лазерно-осажденной пленки оксида лантана, легированной эрбием, на стекле (*а, б*) и профиль сечения рельефа поверхности пленок вдоль выделенной линии (*в*)

Резкий скачок пропускания лазерно-осажденной пленки оксида лантана, легированной эрбием, на кремнии наблюдается в ближней ИК-области спектра от $\lambda = 978$ нм до значения $T = 2,7\%$ на длине волны $\lambda = 1152$ нм (рис. 3, *а*). Максимальное значение пропускания $T = 3,4\%$ достигает на длине волны $\lambda = 2038$ нм. Пропускание пленки в средней ИК-области остается постоянным $T \sim 4\%$ в интервале частот от

$\nu = 2340 \text{ см}^{-1}$ до $\nu = 3977 \text{ см}^{-1}$ (рис. 3, б). Спектр коэффициента отражения R наноструктурированной пленки на кремниевой подложке (рис. 3, в) носит осциллирующий характер с четырьмя пиками на длинах волн $\lambda_1 = 285,1 \text{ нм}$, $\lambda_2 = 343,6 \text{ нм}$, $\lambda_3 = 427,1 \text{ нм}$ и $\lambda_4 = 627,9 \text{ нм}$. Также на рис. 3, в представлен спектр отражения исходной кремниевой подложки.

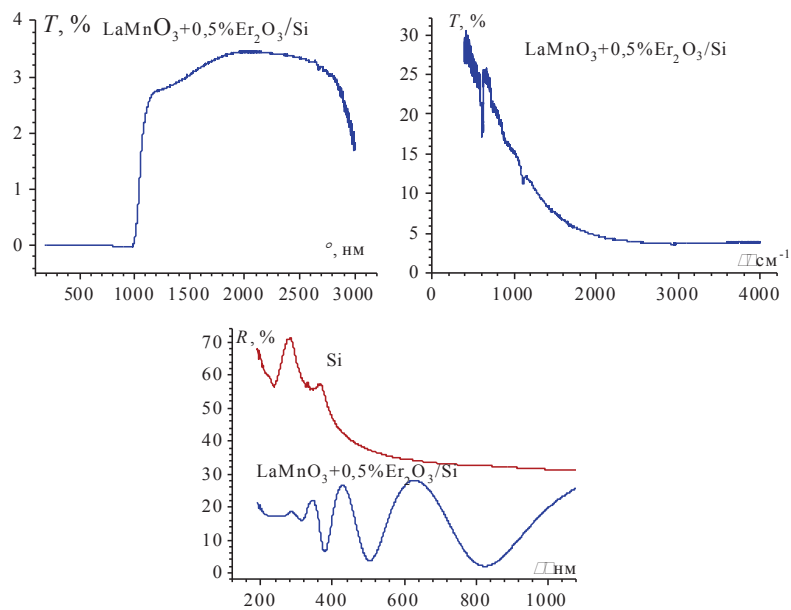


Рис. 3. Спектр пропускания лазерно-осажденной пленки оксида лантана, легированной эрбием, на кремниевой подложке в видимой и ближней ИК-области (а), средней ИК-области (б). Спектр отражения лазерно-осажденной пленки оксида лантана, легированной эрбием, на кремниевой подложке в видимой и ближней ИК-области (в)

На рис. 4, а представлены темновые ВАХ, измеренные при воздействии лазерного излучения разной длины волны.

Как видно в области отрицательных напряжений наблюдается фотоэффект. При напряжении 5 В была построена спектральная чувствительность (рис. 4, б) с двумя максимумами на длине волны: 780 нм – 0,11 мА/Вт и на длине волны 980 нм – 0,17 мА/Вт.

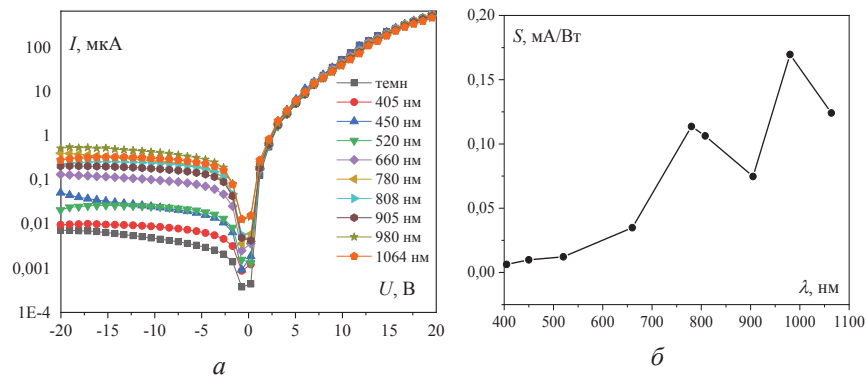


Рис. 4. ВАХ структуры $\text{LaMn}_4\text{O}_3 + 0,5\%\text{Er}_2\text{O}_3/\text{Si}$ темновые при воздействии лазерного излучения разной длины волны (а) и спектральная чувствительность структуры (б)

Получены тонкие пленки оксида лантана, легированные эрбием, на кремниевой и стеклянной подложках с развитой структурой поверхности. Средняя высота рельефа поверхности пленок на кремнии составляет 37 нм при среднеквадратичной шероховатости 15 нм. Наблюдается значительное количество образований в виде капель диаметром до 2,2 мкм и высотой до 120 нм. Средняя высота микровыступов пленки на стеклянной подложке составляет 19 нм, а латеральный размер капельной фазы находится в диапазоне 0,15–1,2 мкм. Максимальное значение пропускания лазерно-осажденной пленки оксида лантана, легированной эрбием, на

кремнии наблюдается в ближней ИК-области спектра и достигает величины $T = 3,4\%$ на длине волны $\lambda = 2038$ нм. Спектр коэффициента отражения R наноструктурированной пленки на кремниевой подложке носит осциллирующий характер с четырьмя пиками. Структура $\text{LaMn}_4\text{O}_3 + 0,5\%\text{Er}_2\text{O}_3/\text{Si}$ обладает fotocувствительностью $0,11$ мА/Вт на длине волны 780 нм и $0,17$ мА/Вт на длине волны 980 нм.

Литература

1. Potential of AMnO_3 ($A = \text{Ca}, \text{Sr}, \text{Ba}, \text{La}$) as Active Layer in Inorganic Perovskite Solar Cells / M. Mužević, I. Lukačević, I. Kovač [et al.] // ChemPhysChem. – 2023. – Vol. 24. – Iss. 9. e202200837.
2. Минько Л. Я., Чумаков А. Н., Босак Н. А. Об эффективном режиме эрозионного приповерхностного плазмообразования в воздухе при импульсно-периодическом лазерном воздействии // Квантовая электроника. – 1990. – Т. 17, № 11. – С. 1480–1484.