

МОРФОЛОГИЯ И СТРУКТУРА ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ

С. С. Ануфрик*, Н. Н. Курьян, И. Г. Сергиенко, С. Н. Анучин

УДК 621.793.8;537.533.35

Гродненский государственный университет им. Янки Купалы, Гродно, Беларусь;
e-mail: anufrick@grsu.by

(Поступила 17 февраля 2023)

Исследованы оптические свойства, морфология и структура покрытий из наночастиц редкоземельных металлов La, Nd, Pr, Y, полученных методом лазерной абляции Nd^{3+} :YAG-лазером в различных средах (воздухе, дистиллированной воде). Установлено, что электронные спектры поглощения коллоидных растворов исследуемых наночастиц имеют максимумы в УФ- и видимой областях. Оптическая плотность растворов изменялась от 0.2 до 1.6 при толщине поглощающего слоя 10 мм и одинаковых условиях возбуждения на длине волны 1064 нм. Методом атомно-силовой микроскопии исследованы размеры наночастиц редкоземельных металлов и микроморфология осажденных покрытий в воздушной и водной средах. Показано, что осажденные наноструктуры исследуемых металлов имеют разную морфологию, различаются формой и размерами наночастиц, которые зависят от среды осаждения.

Ключевые слова: редкоземельный металл, морфология поверхности, наночастица, энергия абляции, атомно-силовая микроскопия, среда осаждения.

The optical properties, morphology, and structure of coatings from nanoparticles of rare-earth metals La, Nd, Pr, and Y, obtained by laser ablation with Nd^{3+} :YAG laser in various media (air, distilled water), have been studied. It has been established that the electronic absorption spectra of colloidal solutions of the nanoparticles have maxima in the ultraviolet and visible regions of the spectrum. The optical density of the solutions varied from 0.2 to 1.6 with an absorbing layer thickness of 10 mm and the same excitation conditions at wavelength of 1064 nm. The dimensional parameters of rare-earth metal nanoparticles and the micro-morphology of deposited coatings in air and water have been studied by atomic force microscopy. It has been shown that the deposited nanostructures of the studied metals have different morphologies and differ in the shape and size parameters of the nanoparticles, which depend on the deposition medium.

Keywords: rare-earth metal, surface morphology, nanoparticle, ablation energy, atomic force microscopy, deposition medium.

Введение. В настоящее время наноструктурированные материалы широко используются в оптоэлектронике, фотонике, машиностроении, а также для получения новых композитных сред. Наличие наночастиц (НЧ) в материалах изменяет их физико-химические свойства. Среди способов получения НЧ наиболее перспективен метод лазерной абляции, который позволяет без использования каких-либо прекурсоров получать чистые наноразмерные продукты практически из любых материалов [1—8]. Большое внимание при этом уделяется лазерной абляции благородных металлов [9—14], а также цветных металлов и композитных материалов в различных средах [15—20]. В зависимости от среды, в которой происходит процесс абляции, возможно образование НЧ, по составу идентичных материалу мишени, или получение их оксидов, карбидов, гидроксидов. В работе [17] изучены спектральные зависимости оптической плотности наносuspensions алюминия, показано поглощение в УФ-области, характерное для многих металлических материалов. В [18, 19] получены НЧ никеля, цинка, хрома

MORPHOLOGY AND STRUCTURE OF COATINGS OBTAINED BY LASER ABLATION OF RARE EARTH METALS

S. S. Anufrick*, N. N. Kurian, I. G. Sergienko, S. N. Anuchin (Yanka Kupala State University of Grodno, Grodno, Belarus; e-mail: anufrick@grsu.by)

в дистиллированной воде. Показано, что при абляции данных металлов преимущественно образуются частицы сферической формы размерами до 100 нм. В [20—24] получены НЧ благородных металлов при лазерной абляции в жидкости с использованием лазера на парах меди и Nd:YAG-лазера, в [25] изучен механизм формирования НЧ Au и Ag в водном коллоидном растворе додецилсульфата натрия в зависимости от плотности энергии, размера лазерного пятна и частоты лазерных импульсов.

В последнее время большое внимание уделяется получению и применению НЧ редкоземельных металлов (РЗМ). РЗМ обладают уникальными электронными свойствами, что делает наноматериалы на их основе перспективными в области преобразования энергии, биомедицины, отображения и обработки информации. Функционализирование ионов РЗМ с НЧ благородных металлов позволяет создавать материалы с новыми оптическими свойствами [26]. В работе [27] изучено влияние плазмонных эффектов в NaYF_4 , допированном ионами Yb^{3+} , Er^{3+} , на оптические характеристики РЗМ. При определенных условиях плазмонный резонанс может уменьшать порог накачки лазерных сред благодаря усилению ап-конверсии на частицах РЗМ [27, 28]. В работах [29—32] показано, что НЧ РЗМ могут изменять структуру жидкокристаллической матрицы и придавать ей новые функциональные свойства, использоваться в качестве сенситизаторов в жидкокристаллических средах. НЧ РЗМ интенсивно изучаются для возможных биомедицинских приложений, фотодинамической терапии, освещения и безопасности. Анализ литературных источников свидетельствует о многообразии областей применения, важности и актуальности исследований по получению и изучению свойств НЧ РЗМ. Несмотря на большое количество работ, механизм формирования НЧ РЗМ в различных средах изучен не в полной мере, отсутствуют данные по воздействию лазерного излучения умеренной интенсивности и плотности энергии на концентрацию, размеры и форму образующихся НЧ в различных средах.

Цель настоящей работы — выявление новых закономерностей при воздействии лазерного излучения умеренной интенсивности с плотностью энергии $0.5\text{—}0.6\text{ Дж/см}^2$ на морфологию и размеры осажденных наноструктур РЗМ в воздушной и водной средах.

Объекты и методы исследования. Облучение поверхности исследуемых образцов металлов и получение их НЧ проводилось на экспериментальной установке, представленной на рис. 1. Источником излучения служил Nd^{3+} :YAG-лазер (LS-2147 Lotis), работающий в режиме модуляции добротности на $\lambda = 1064\text{ нм}$ с частотой следования импульсов 10 Гц. Длительность лазерного импульса 16 нс при энергии генерации 280 мДж. НЧ металлов нарабатывались в воздушной и водной средах в течение 20 мин. Для получения НЧ в водной среде образцы РЗМ помещались в стеклянную кювету с дистиллированной водой объемом 20 мл. Диаметр расфокусированного пятна на подложке $\sim 1\text{ см}$. Для наилучшего напыления НЧ мишень располагали под углом 45° относительно подложки. Угол падения возбуждающего излучения 45° . При облучении металлов в водной среде полученный коллоидный раствор наносился на поверхность подложки и высушивался при комнатной температуре. Для исследования морфологии НЧ, осажденных на диэлектрические покрытия, при лазерной абляции РЗМ La, Nd, Pr и Y использован атомно-силовой микроскоп NT-206. Спектры поглощения коллоидных растворов исследуемых НЧ зарегистрированы на спектрофотометре Specord 200 в кварцевой кювете толщиной 10 мм.

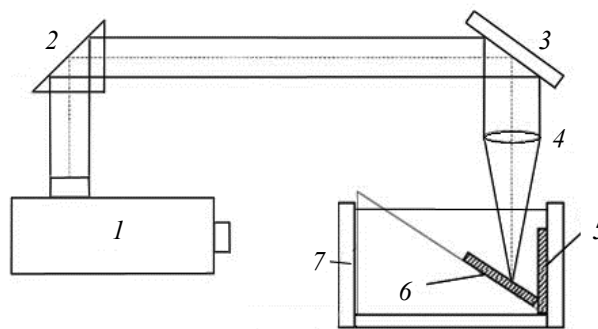


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — лазер, 2 — поворотная призма, 3 — поворотное зеркало, 4 — фокусирующая линза ($f = 614\text{ мм}$), 5 — подложка (кварцевое стекло), 6 — мишень (металл), 7 — кювета

Результаты и их обсуждение. На первом этапе изучен элементный химический состав образцов РЗМ. Степень чистоты металлов исследована на спектрометре энергий рентгеновского излучения СЕР-01 ElvaX согласно методике МВИ.МН 4092-2011 методом рентгеновской флуоресценции. Результаты представлены в табл. 1. Как видно, химическая чистота исследуемых РЗМ предельно высокая, наблюдаются незначительные примеси циркония для La и Y и селена для Y.

Т а б л и ц а 1. Концентрация и элементный состав примесей в образцах РЗМ

РЗМ	Примесь	
	Элемент	Концентрация, %
La	⁵⁷ La	99.494
	⁴⁰ Zr	0.506
Nd	⁶⁰ Nd	100.0
Pr	⁵⁹ Pr	100.0
Y	³⁴ Se	0.073
	³⁹ Y	97.006
	⁴⁰ Zr	2.921

Как известно [33], для коллоидных растворов НЧ существует зависимость оптической плотности от размеров частиц. При наличии в растворе наиболее мелких (десятки нанометров) изолированных НЧ спектр поглощения характеризуется узкой и интенсивной полосой поглощения (ПП). Увеличение размеров НЧ сопровождается длинноволновым сдвигом и расширением основной ПП. Поэтому вначале исследованы спектры поглощения коллоидных растворов НЧ La, Nd, Pr и Y (рис. 2).

Как видно (рис. 2, а), спектр поглощения коллоидного раствора НЧ лантана содержит два характерных максимума — 270 и 320 нм (кривая 1). Сравнение положения максимумов спектров поглощения НЧ La (кривая 1) со спектром поглощения чистого коммерческого оксида лантана La₂O₃ (ТУ 48-4-523-90) (кривая 2) показывает их идентичность, что указывает на формирование НЧ оксидов лантана при лазерной абляции в воде (раствор мутнеет и начинает опалесцировать).

Процесс лазерной абляции связан с высокотемпературным нагревом металлической мишени, последующим испарением и конденсацией НЧ металлов и их оксидов в воздушной и водной средах. На рис. 2 дополнительно приведены спектры оксидов исследуемых РЗМ и ионов Nd³⁺. В [38] методом ИК-спектроскопии показано, что при нагревании оксиды цериевой подгруппы (Nd, Pr) реагируют с H₂O и CO₂ воздуха с образованием кристаллизационной воды, гидроксидов и карбонатов, а оксиды иттриевой подгруппы (Y, La) слабо адсорбируют пары воды. В ИК-спектрах РЗМ четко наблюдаются полосы гидроксидов и карбонатов РЗМ.

В спектре поглощения ионов Nd³⁺ в пленке гадолиний-галлиевого граната [34] (рис. 2, б, кривая 2) наблюдаемые максимумы соответствуют термам штарковских уровней. Установлено, что положение этих полос не зависит от концентрации Nd и совпадает с их положением в спектре поглощения НЧ Nd в воде. Спектр поглощения коллоидного раствора НЧ Nd (кривая 1) содержит два уширенных и слабовыраженных максимума при 280 и 600 нм. Оптическая плотность раствора достаточно мала ($D \sim 0.25$), что обусловлено низкой концентрацией Nd в растворе ($\sim 0.25 \cdot 10^{-5}$ моль/дм³). Сравнение со спектром поглощения ионов Nd³⁺ (кривая 2) показывает, что максимумы спектра поглощения металлических НЧ в целом соответствует главным максимумам спектра поглощения Nd [34]. Однако имеются и различия. По сравнению с Nd³⁺ ПП НЧ вблизи 280 нм достаточно широкая и смещена в коротковолновую область. Максимум при 600 нм является бесструктурным и уширенным, отсутствует поглощение при 800 нм.

Спектр поглощения коллоидного раствора Pr (рис. 2, в, кривая 1) содержит слабовыраженные максимумы при 440 и 490 нм. Оптическая плотность раствора НЧ $D \sim 0.3$, что соответствует концентрации $\sim 0.3 \cdot 10^{-5}$ моль/дм³. Сравнение со спектром оксида празеодима (кривая 2) показывает, что положение основных максимумов НЧ Pr совпадает, однако сами максимумы достаточно широкие и бесструктурные.

На рис. 2, г (кривая 1) представлен спектр поглощения коллоидного раствора НЧ Y, который содержит два максимума: первый, растянутый и пологий ($\Delta\lambda = 320\text{—}380$ нм), и второй, узкий, слабоинтенсивный ($\Delta\lambda = 580\text{—}590$ нм). Оптическая плотность раствора НЧ Y $D \sim 0.2$, что соответствует концентрации $\sim 0.2 \cdot 10^{-5}$ моль/дм³. Сравнение со спектром оксида иттрия (кривая 2) показывает соответ-

ствие максимумов в коротковолновой области и основного пика поглощения вблизи 570 нм. Отсутствие структурированности в спектре НЧ Y может быть связано с их размерными эффектами.

Различие оптических плотностей растворов НЧ РЗМ, полученных при идентичной энергии абляции, по-видимому, связано с различием их физико-химических свойств. Широкие ПП и сравнительно низкая интенсивность максимумов в спектрах, вероятно, связаны с большим разбросом размеров содержащихся в растворах НЧ металлов и сравнительно малой концентрацией. Сравнение спектров поглощения коллоидных растворов НЧ РЗМ со спектрами их оксидов подтверждает, что при абляции в водной среде формируются разноразмерные НЧ, оксиды и сопутствующие им соединения [38].

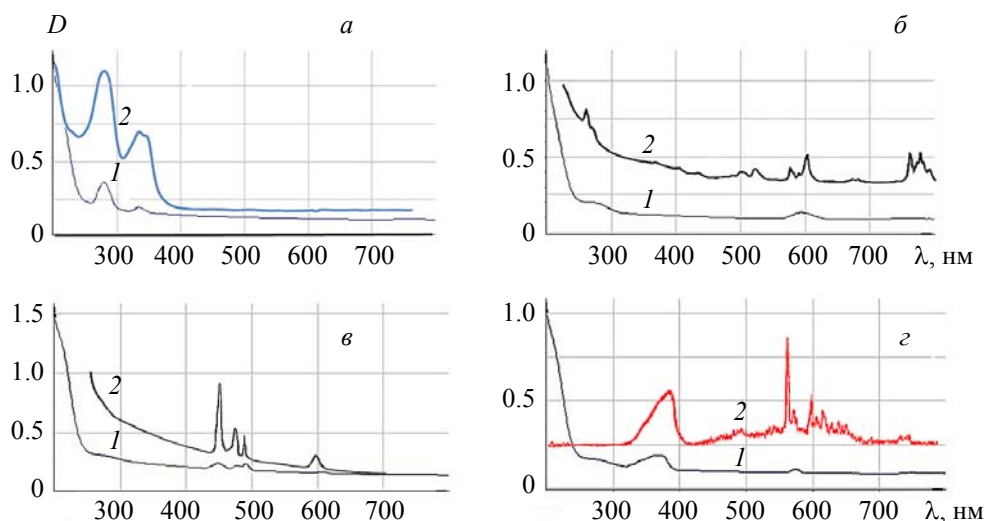


Рис. 2. Спектры поглощения: 1 — коллоидов НЧ (толщина исследуемого слоя 10 нм) лантана (а), неодима (б), празеодима (в), иттрия (з); 2 — ионов Nd^{3+} [34] и оксидов La [35], Pr [36], Y [37]

Для выяснения размерных характеристик полученных НЧ методом зондовой микроскопии исследовались осажденные на диэлектрические покрытия наноструктуры, полученные при абляции РЗМ в воздушной и водной средах при указанной ранее энергии лазерной абляции (рис. 3—6).

Анализ АСМ-изображения (рис. 3, а) показывает, что НЧ La размерами 10—400 нм, полученные в воздушной среде, образуют на поверхности неравномерное покрытие. Более мелкие (~50 %) НЧ размерами 20—40 нм имеют преимущественно овальную форму, распределены цепочками и, очевидно, соответствуют главному максимуму в спектре поглощения. Более крупные НЧ (>100 нм), образующие конгломераты неправильной или близкой к пирамидальной форме, соответствуют, вероятно, побочному максимуму в спектре поглощения. При получении НЧ La в водной среде размеры и концентрация осажденных НЧ возрастают (рис. 3, б). При этом представленные наноструктуры содержат как обособленные НЧ (80—100 нм), так и конгломераты более крупных НЧ размерами до 500 нм преимущественно пирамидальной формы.

АСМ-изображения наноструктур, полученных при абляции Nd в воздушной и водной средах, представлены на рис. 4. Морфология покрытия неодима в воздушной среде (рис. 4, а) показывает, что оно содержит конгломераты НЧ размерами от 500 нм до 1 мкм, состоящие из более мелких НЧ размерами 50—75 нм пирамидальной формы. Наличие в растворе НЧ разных размеров приводит к уширению основных ПП НЧ Nd [9]. Вероятно, более мелкие НЧ создают коротковолновую ПП, а их конгломераты — поглощение вблизи 600 нм. Сравнение снимков, полученных в водной и воздушной средах, показывает, что морфологии покрытий существенно различаются. При абляции в водной среде (рис. 4, б) на подложке заметно меньше осажденных НЧ Nd преимущественно размером ~30—60 нм пирамидальной формы, т. е. водная среда способствует большей изоляции НЧ и ограничивает их агрегацию.

На рис. 5 представлены АСМ-изображения наноструктур, осажденных на диэлектрическое покрытие, полученных при абляции Pr в воздушной и водной средах. Морфология покрытия (рис. 5, а) достаточно равномерная и образована НЧ размерами 60—110 нм овальной формы. Имеется незначительное количество НЧ размером ~150 нм. Наблюдаются также крупные наноструктуры овальной по

основанию формами размерами $\sim 1 \times 1 \times 1$ мкм, расположенные вдоль одной из осей координат, состоящие из более мелких НЧ. При получении НЧ Рг в водной среде (рис. 5, б) формируется достаточно равномерное и однородное покрытие, состоящее преимущественно из мелких (15—24 нм), вытянутых НЧ. Видны также несколько отдельных наноструктур высотой до 350 нм и до 500 нм по основанию.

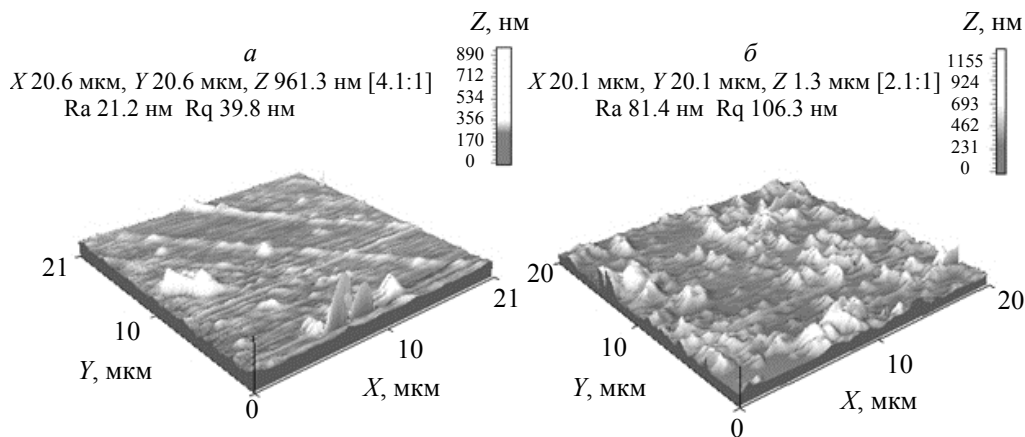


Рис. 3. АСМ-изображения осажденных НЧ, полученных при абляции La в воздушной (а) и водной (б) средах

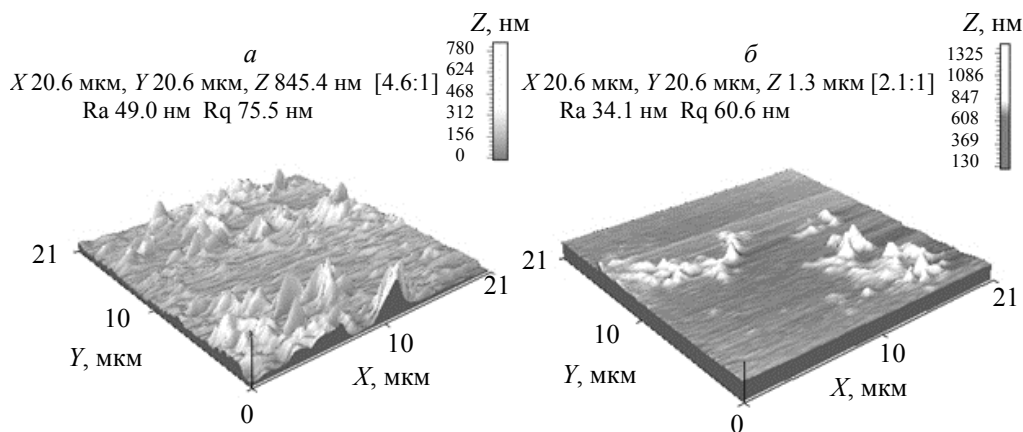


Рис. 4. АСМ-изображения осажденных НЧ, полученных при абляции Nd в воздушной (а) и водной (б) средах

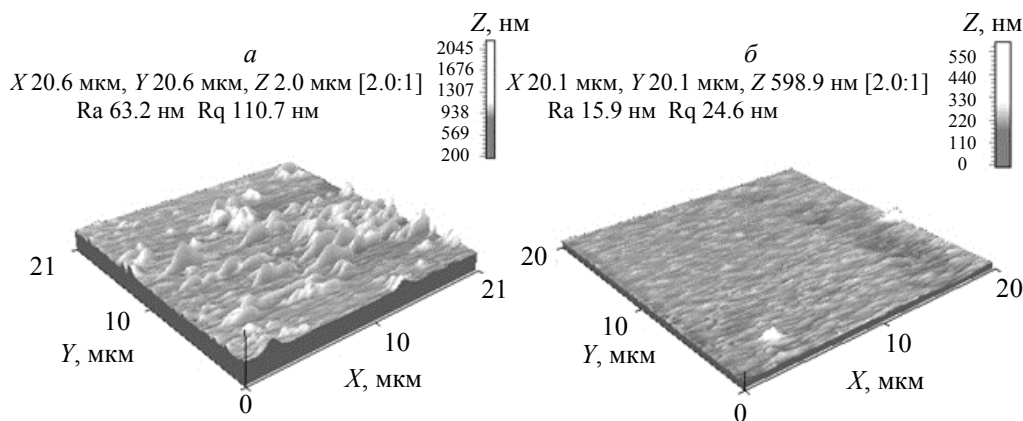


Рис. 5. АСМ-изображения осажденных НЧ, полученных при абляции Рг в воздушной (а) и водной (б) средах

АСМ-изображения осажденных на диэлектрические покрытия наноструктур, полученных при абляции Y в воздушной и водной средах, представлены на рис. 6. Морфология покрытия в воздушной среде (рис. 6, *а*) представлена как сравнительно мелкими (13—20 нм) сферическими (овальными) НЧ, так и достаточно крупными (высотой ~300 нм и ~1 мкм по основанию) наноструктурами пирамидальной формы, собранными в цепочки. При абляции Y в водной среде (рис. 6, *б*) на подложке наблюдается преимущественное равномерное осаждение обособленных мелких НЧ размером 20—50 нм сферической формы, а также отдельных конгломератов пирамидальной формы. Размер данных образований ≤500 нм, а их формы соответствуют преимущественно пирамидальным, с прямоугольным основанием.

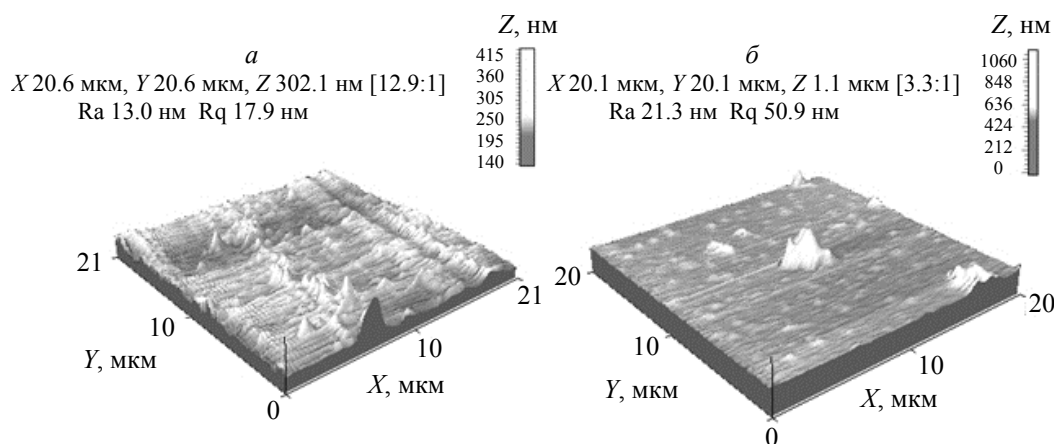


Рис. 6. АСМ-изображения осажденных НЧ, полученных при абляции Y в воздушной (*а*) и водной (*б*) средах

Заключение. При абляции редкоземельных металлов в воздушной и водной средах на диэлектрическом покрытии наблюдаются преимущественно два типа размеров осажденных наночастиц: в воздушной среде размер мелких наночастиц >50 нм, более крупных >1 мкм; в водной среде размер мелких наночастиц 20—50 нм, более крупных ~100—800 нм. Наличие наночастиц редкоземельных металлов разных размеров коррелирует со спектрами их поглощения, расположением и полушириной их максимумов поглощения в коллоидных растворах. Причиной конгломерации наночастиц в водной среде может быть как отсутствие стабилизатора, так и образование химических соединений (оксидов, гидроксидов, карбонатов и др.) в растворе. Показано, что лазерная абляция неодима, празеодима и иттрия в воде позволяет получать преимущественно более мелкие (25—60 нм) наночастицы. Однако для лантана наиболее мелкие (20—40 нм) наночастицы образуются в воздушной среде. При одинаковой энергии абляции различие в морфологии и структуре покрытий обусловлено, вероятно, физико-химическими особенностями исследуемых редкоземельных металлов.

- [1] Г. Н. Макаров. Успехи физ. наук, **183**, № 7 (2013) 673—718
- [2] Л. Ф. Абаева, В. И. Шумский, Е. Н. Петрицкая, Д. А. Рогаткин, П. Н. Любченко. Альманах клин. медицины, № 22 (2010) 10—16
- [3] С. Д. Лещик, П. И. Шупан, И. Г. Сергиенко, Д. А. Линник. Весн. ГрДУ імя Янкі Купалы. Сер. 6, Тэхніка, **6**, № 2 (212) (2016) 44—53
- [4] J. C. Miller. Laser Ablation: Principles and Applications, Springer Berlin Heidelberg (2011) 11—48
- [5] С. Д. Лещик, К. Ф. Зноско, Ю. К. Калугин. Вестн. Брестского гос. тех. ун-та, № 4 (2014) 6—10
- [6] А. В. Симакин, В. В. Воронов, Г. А. Шафеев. Труды ИОФАН, **60** (2004) 83—107
- [7] V. K. Goncharov, K. V. Kozadaev, M. I. Markevich, M. V. Puzyrev, D. L. Slavashevich. J. Eng. Phys. Thermophys., **81**, N 2 (2008) 217—222
- [8] M. Maciulevičius, A. Vinčiūnas, M. Brikas, A. Butsen, N. Tarasenko, N. Tarasenko, G. Račiukaitis. Phys. Proc., **41** (2013) 531—538
- [9] С. С. Ануфрик, С. Н. Анучин, И. Г. Сергиенко. Весн. ГрДУ імя Янкі Купалы. Сер. 6, Тэхніка, **11**, № 1 (2021) 59—65

- [10] **Н. Н. Курьян, С. С. Ануфрик.** Матер. XXV междунар. науч. конф. “Оптика и спектроскопия конденсированных сред”, 22—28 сентября 2019 г., Краснодар, Кубанский гос. ун-т (2019) 70—74
- [11] **С. С. Ануфрик, Н. Н. Курьян, И. Г. Сергиенко, С. Н. Анучин.** Матер. XIII междунар. науч.-техн. конф. “Квантовая электроника”, 22—26 ноября 2021 г., Минск, НИИ ПФП им. А. Н. Севченко БГУ (2021) 394—397
- [12] **Л. А. Захаров.** Вестн. НГУ. Сер. Физика, **5**, вып. 1 (2010) 37—47
- [13] **С. В. Стариков, В. В. Стегайлов, Г. Э. Норман, В. Е. Фортов, М. Ишино, М. Танака, Н. Хасегава, М. Нишикино, Т. Охба, Т. Каихори, Е. Очи, Т. Имазоно, Т. Кавачи, С. Тамотсу, Т. А. Пикуз, И. Ю. Скобелев, А. Я. Фаенов.** Письма в ЖЭТФ, **93**, № 11 (2011) 719—725
- [14] **В. С. Казакевич, П. В. Казакевич, П. С. Яресько, Д. А. Камынина.** Физическое образование в вузах, **22**, № 1 (2016) 159—164
- [15] **В. С. Казакевич, П. В. Казакевич, П. С. Яресько, И. Г. Нестеров.** Изв. Самарского науч. центра РАН, **14**, № 4 (2012) 64—69
- [16] **Е. М. Семенова, С. А. Воробьева, Ю. А. Федотова, В. Г. Баев, А. И. Лесникович.** Сб. ст. “Свиридовские чтения”, вып. 8, Минск, БГУ (2012) 147—155
- [17] **В. А. Светличный, А. И. Стадниченко, И. Н. Лапин.** Изв. вузов. Физика, **60**, № 2 (2017) 157—158
- [18] **С. Д. Лещик, М. Ю. Серенко, П. И. Шупан.** Весн. ГрДУ імя Янкі Купалы. Сер. 6, Тэхніка, **7**, № 2 (2017) 47—57
- [19] **Ф. Бозон-Вердюра, Р. Брайнер, В. В. Воронов, Н. А. Кириченко, А. В. Симакин, Г. А. Шафеев.** Квант. электрон., **8**, № 33 (2003) 714—720
- [20] **С. С. Ануфрик, С. Н. Анучин.** Сб. науч. ст. 11 междунар. науч. конф. “Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности”, ч. 1, 29—30 ноября 2020 г., Казань, ООО “Конверт” (2020) 17—21
- [21] **С. С. Ануфрик, С. Н. Анучин.** Матер. XXVII междунар. науч. конф. “Оптика и спектроскопия конденсированных сред”, 27 сентября—2 октября 2021 г., Краснодар, Кубанский гос. ун-т (2021) 126—134
- [22] **J. Lee, D.-K. Kim, W. Kang.** Bull. Korean Chem. Soc., **27**, N 11 (2006) 1869—1872
- [23] **F. Mafune, J. Kohno, Y. Takeda, T. Kondow, H. Sawabe.** J. Phys. Chem. B, **104**, N 39 (2000) 9111—9117
- [24] **A. Fojtik, A. Henglein.** Ber Bunsenges Phys. Chem., **97**, N 4 (1993) 252—259
- [25] **A. V. Simakin, V. V. Voronov, N. A. Kirichenko, G. A. Shafeev.** Appl. Phys., **79**, N 1 (2004) 1127—1132
- [26] **С. И. Расмагин, Л. А. Апресян, В. И. Крыштоб, В. И. Красовский.** Прикл. физика, № 2 (2018) 64—69
- [27] **W. Park, D. Lu, S. Ahn.** Chem. Soc. Rev., **44** (2015) 2940
- [28] **J. Du, Q. Wang, G. Jiang, C. Xu, C. Zhao, Y. Xiang.** Sci. Rep., **4** (2014) 1
- [29] **Y. F. Wang, L. D. Sun, J. W. Xiao, W. Feng, J. C. Zhou, J. Shen, C. H. Yan.** Eur. J. Chem. A, **18**, N 18 (2012) 5558—5564
- [30] **C. Liu, Y. Hou, M. Gao.** Adv. Mater., **26**, N 40 (2014) 6922—6932
- [31] **C. Bouzigues, T. Gacoin, A. Alexandrou.** ACS Nano., **5**, N 11 (2011) 8488—8505
- [32] **Д. Н. Чаусов, А. Д. Курилов, В. В. Беляев.** Liq. Cryst. Appl., **20**, N 2 (2020) 6—22
- [33] **W.-R. Li, X.-B. Xie, Q.-S. Shi, H.-Y. Zeng, Y.-S. Ou-Yang, Y.-B. Chen.** Appl. Microbiol. Biotechnol., **85**, N 4 (2010) 1115—1122
- [34] **В. В. Рандошкин, Н. В. Васильева, В. Г. Плотниченко, Ю. Н. Пырков, С. В. Лаврищев, М. А. Иванов, А. А. Кирюхин, А. М. Салецкий, Н. Н. Сысоев.** ФТТ, № 6 (2004) 1001—1007
- [35] **В. А. Кочедыков, И. Д. Закирьянова, И. В. Корзун.** Аналитика и контроль, **9**, № 1 (2005) 58—63
- [36] **Л. М. Савенко, А. В. Ефимочкина, И. В. Степанова.** Успехи в химии и химической технологии, **34**, № 4 (2022) 62—64
- [37] **В. И. Соломонов, В. В. Осипов, В. А. Шитов, К. Е. Лукьяшин, А. С. Бубнова.** Опт. и спектр., **128**, № 1 (2020) 5—9
- [38] **В. А. Кочедыков, И. Д. Закирьянова.** Сб. науч. тр. XI всерос. конф. “Строение и свойства металлических и шлаковых расплавов”, Екатеринбург, **3** (2004) 196