

ЭФФЕКТ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ЭКСПОНИРОВАНИЯ В ПРОЦЕССЕ ЛАЗЕРНОЙ ГЕНЕРАЦИИ НАНОЧАСТИЦ КРЕМНИЯ

И. Н. Сараева¹, А. К. Иванова^{1,2}, С. И. Кудряшов^{1,3}, А. А. Настулявичус¹

Наночастицы кремния были получены методом наносекундной лазерной абляции монокристаллической пластинки под слоем деионизированной воды. Механизмы генерации наночастиц были исследованы в зависимости от плотности падающей энергии лазерного излучения (7–12 Дж/см²) и скорости сканирования (10–750 мм/с). При скорости сканирования 150–200 мм/с наблюдается максимум значения коэффициента экстинкции полученных коллоидных растворов наночастиц, что может быть связано с увеличением их массового выхода.

Ключевые слова: лазерная абляция, наночастицы кремния.

Введение. Лазерная абляция материалов в жидких средах является одним из наиболее распространенных методов генерации наночастиц (НЧ) широкого спектра материалов, однако до сих пор не было осуществлено внедрение лазерной фабрикации в промышленные приложения. НЧ, полученные данным методом, обладают повышенной чистотой по сравнению с химически синтезированными частицами, и лазерная наработка позволяет варьировать их морфологию и размеры, однако для эффективного применения в областях биомедицины, наноэлектроники и хемо-, и биосенсорики [1–7] данная методика считается непригодной вследствие малого выхода продуктов абляции. В связи с этим производится поиск оптимальных параметров лазерной обработки, позволяющих достигать эффективности абляции до мг/ч. В ряде исследований были продемонстрированы результаты по оптимизации наработки коллоидных растворов путем изменения формы обрабатываемых мишеней (переход от плоскостей к проволокам) с целью избежать образования пузырей, препятствующих поглощению лазерных им-

¹ ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: insar@lebedev.ru.

² НИЯУ МИФИ, 115409 Россия, Москва, Каширское шоссе, 31.

³ Университет ИТМО, 197101 Россия, Санкт-Петербург, Кронверкский проспект, 49.

пульсов поверхностью, а также путем изменения частоты следования импульсов и т.д. В данной работе коллоидные растворы наночастиц кремния были получены методом наносекундной ИК лазерной абляции массивной мишени в деионизованной воде. Было проведено исследование их оптических свойств в зависимости от энергии лазерного излучения и времени экспонирования мишени.



Рис. 1: Схема эксперимента для наработки наночастиц кремния методом лазерной абляции.

Экспериментальная часть. На пластинку монокристаллического кремния с помощью f-theta объектива (фокусное расстояние $F = 160$ мм) под слоем деионизированной воды (толщина слоя ~ 2 мм) фокусировалось лазерное излучение волоконного Yb^{3+} -лазера НТФ Mark (Vulat) (длина волны $\lambda = 1064$ нм, частота импульсов $f = 20$ кГц, длительность импульсов на полуширине $\tau = 120$ нс, максимальная энергия в импульсе $E \sim 1$ мДж), и осуществлялась многопроходная обработка областей 15×15 мм² с помощью гальванометрического сканатора. Обработка мишени осуществлялась при различных скоростях сканирования $v = 10 - 750$ мм/с и плотностях энергии $F = 7 - 12$ Дж/см² (за импульс).

Лазерная абляция сопровождалась образованием НЧ кремния, которые затем были исследованы в виде коллоидных растворов методом оптической спектроскопии пропускания (спектрофотометр СФ-2000) в спектральном диапазоне измерений 200–1000 нм, с пересчетом спектров пропускания в коэффициент экстинкции α_{ext} .

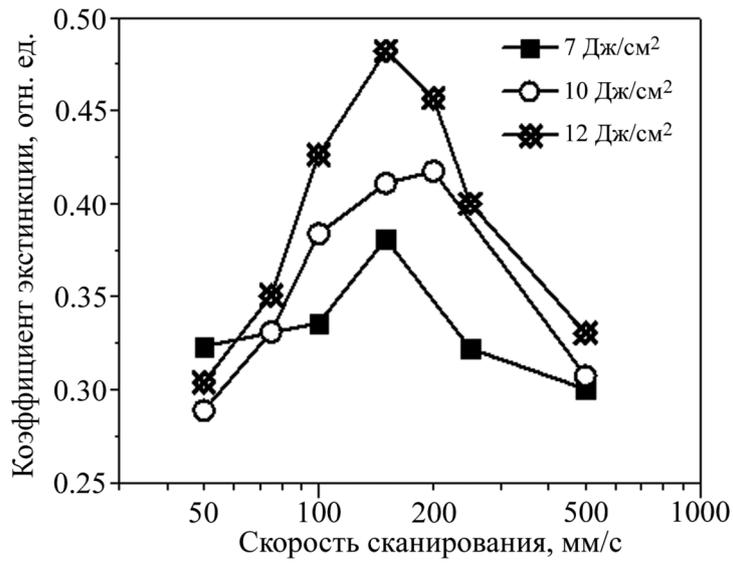


Рис. 2: Коэффициент экстинкции коллоидных растворов НЧ в зависимости от скорости сканирования лазера для различных плотностей энергии.

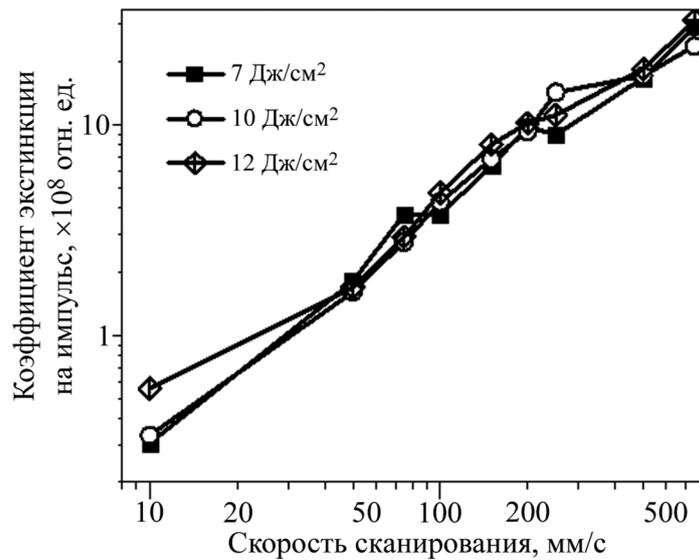


Рис. 3: Зависимость коэффициента экстинкции на импульс от скорости сканирования (оси представлены в десятичных логарифмах).

Экспериментальные результаты и их обсуждение. Зависимости коэффициента экстинкции от скорости сканирования при различных плотностях энергии обладают немонотонным характером, демонстрируя максимум в области $v = 150 - 200$ мм/с

(рис. 2), однако при пересчете α_{ext} в значение, соответствующее коэффициенту экстинкции на импульс

$$\alpha_1 = \alpha_{\text{ext}}/N; \quad N = d \cdot f/v,$$

(N – число импульсов, приходящихся на точку поверхности, d – диаметр сфокусированного лазерного пучка), зависимость становится линейной (рис. 3), с углом наклона кривой $\sim v^{1.03}$.

Рост коэффициента экстинкции связан с увеличением массового выхода НЧ, однако наблюдаемая динамика его изменения противоречит полученным ранее данным [8], согласно которым массовый выход НЧ линейно растет с увеличением частоты следования импульсов.

Заключение. В данной работе методом ИК наносекундной лазерной абляции массивной мишени кремния были получены коллоидные растворы наночастиц, а также исследована зависимость их коэффициента экстинкции от скорости передвижения и плотности энергии лазерного излучения.

Работа была поддержана грантом Министерства образования и науки РФ (госзадание № 16.7917.2017/8.9).

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] G.P. Zograf, M.I. Petrov, S.V. Makarov, IOP Conf. Series: J. Phys.: Conf. Ser. **929**(1), 012072 (2017).
- [2] I. Monaco, F. Arena, S. Biffi, et al., Bioconjugate chemistry **28**(5), 1382 (2017).
- [3] X. Ma, Y. Zhao, X. J. Liang, Acc. Chem. Res. **44**(10), 1114 (2011).
- [4] S. M. Janib, A. S. Moses, J. A. MacKay, Advanced drug delivery reviews **62**(11), 1052 (2010).
- [5] A. V. Chebykin, A. S. Zalogina, D. A. Zuev, S. V. Makarov, AIP Conference Proceedings **1874**(1), 030006 (2017).
- [6] R. Ghosh Chaudhuri, S. Paria, Chemical reviews **112**(4), 2373 (2011).
- [7] F. Ruffino, A. Pugliara, E. Carria, et al., Nanotechnology **23**(4), 045601 (2012).
- [8] R. Streubel, S. Barcikowski, B. Gökce, Optics letters **41**(7), 1486 (2016).

Поступила в редакцию 18 октября 2018 г.

Печатается по материалам конференции “UltrafastLight-2018” (Москва, ФИАН, 2018).