

Формирование нанокompозитных структур при лазерном облучении $\lambda = 1,064$ мкм DVD-R, покрытого алюминиевой фольгой

Г. Ф. Копытов¹, А. Ю. Ставцев¹, А. П. Кузьменко² ✉, А. И. Жакин²,
В. В. Филиппов³, Ю. А. Неручев⁴

¹ Московский государственный университет технологий и управления имени К. Г. Разумовского (Первый казачий университет)
ул. Земляной Вал, д. 73, г. Москва 109004, Российская Федерация

² Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

³ Липецкий государственный педагогический университет имени П. П. Семенова-Тян-Шанского
ул. Ленина, д. 42, г. Липецк 398020, Российская Федерация

⁴ Курский государственный университет
ул. Радищева, д. 33, г. Курск 305000, Российская Федерация

✉ e-mail: apk3527@mail.ru

Резюме

Цель работы. Получение, характеристика и математическое описание методами Фурье-анализа атомно-силовых микроскопических изображений 1D-мерных висцероподобных нанокompозитных структур, формируемых в условиях высокоинтенсивной лазерной обработки. Формирование из поликарбоната с внутренними тонкими слоями из Al, полупроводниковых металлов Si, Sb, Te, Ge и соединений ZnS и SiO₂ в составе DVD-R-5 диска, покрытого алюминиевой фольгой.

Методы. Использовано импульсно-периодическое лазерное излучение для обработки образцов DVD-R-5. Формируемые структуры были изучены методами конфокальной, атомно-силовой и сканирующей электронной микроскопии. По атомно-силовым изображениям проведены прямое и обратное преобразование Фурье. Анализ решений уравнения теплового баланса применительно к результатам выполненной лазерной обработки.

Результаты. При высокоскоростном воздействии лазерным излучением (моды TEM₀₁ или TEM₁₀) на образец DVD-R-5, покрытый алюминиевой фольгой, обнаружены и изучены ВНС. С помощью прямого и обратного преобразований Фурье по атомно-силовым изображениям поверхности после лазерной обработки подтверждена периодичность формируемых ВНС. Показано, что процесс лазерной обработки DVD-R-5 является адиабатическим, скорость распространения фронта волны плавления превышает звуковую в поликарбонате. Обоснован вывод о формировании ВНС за счет самофокусировки и филаментации лазерного излучения в отраженных дифрагирующих лучах каждой из составляющих мод.

Вывод. В условиях высокоинтенсивной лазерной обработки импульсно-периодическим лазерным излучением с модами TEM_{01} или TEM_{10} формируются 1D-мерные ВНС с толщиной у основания до 0,5 мкм и высотой свыше 1 мкм, состав которых может включать как проводники, полупроводники, так и их соединения. Полученные ВНС обладают высокоразвитой упорядоченной поверхностной структурой, что может свидетельствовать о перспективности их применения.

Ключевые слова: лазерная обработка; импульсно-периодическое лазерное излучение; поперечные моды излучения; висцероподобные нанокompозитные материалы.

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-32-90063\19 и (з/з № 0851-2020-0035) и при реализации программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» (Соглашение № 075-15-2021-1213) Министерства науки и образования Российской Федерации.

Благодарности: Авторы выражают глубокую благодарность М. И. Гозману за внимание к данной работе, обсуждение математических аспектов обработки рельефа.

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

Для цитирования: Формирование нанокompозитных структур при лазерном облучении $\lambda = 1,064$ мкм DVD-R, покрытого алюминиевой фольгой / Г. Ф. Копытов, А. Ю. Ставцев, А. П. Кузьменко, А. И. Жакин, В. В. Филиппов, Ю. А. Неручев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2023. Т. 13, № 2. С. 120–135. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-2-120-135>

Поступила в редакцию 28.02.2023

Подписана в печать 20.04.2023

Опубликована 30.05.2023

Formation of Nanocomposite Structures under Laser Irradiation $\lambda = 1.064 \mu\text{m}$ DVD-R Coated with Aluminum Foil

Gennady E. Kopytov¹, Alexei Yu. Stavtsev¹, Aleksander P. Kuzmenko² ✉,
Anatolii I. Zhakin², Vladimir V. Filippov³, Yurii A. Neruchev⁴

¹ K. G. Razumovsky Moscow State University of Technologies and Management
73 Zemlyanoy val Str., Moscow 109004, Russian Federation

² Southwest State University
50 Let Oktyabrya Str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

³ Lipetsk State Pedagogical University named after P. P. Memenov-Tyan-Shansky
42 Lenina Str., Lipetsk 398020, Russian Federation

⁴ Kursk State University
33 Radishcheva Str., Kursk 305000, Russian Federation

✉ e-mail: apk3527@mail.ru

Abstract

Purpose. Obtaining, characterization and mathematical description of atomic force microscopic images of 1D-dimensional whisker-like nanocomposite structures formed under the conditions of high-intensity laser processing using. Formation of polycarbonate with inner thin layers of Al, semiconductor metals Si, Sb, Te, Ge, and ZnS and SiO₂ compounds in a DVD-R-5 disc covered with aluminum foil.

Methods. Applied pulsed laser radiation for laser processing of DVD-R-5 was used. The methods of confocal, atomic force and scanning electron microscopy to study micro- and nanostructuring after laser processing of DVD-R-5 patterns were used. The direct and inverse Fourier transforms atomic force images were carried out. Analysis of solutions to the heat balance equation as applied to the results of laser processing was performed.

Results. Under high-speed exposure to laser radiation (TEM01 or TEM10 modes) on a DVD-R-5 sample coated with aluminum foil, VNS were detected and studied. With the help of direct and inverse Fourier transforms on atomic force images of the surface after laser processing, the periodicity of the formed VNS was confirmed. It is shown that the process of DVD-R-5 laser processing is adiabatic, the propagation velocity of the melting wave front exceeds the sonic one in polycarbonate. The conclusion about the formation of VNS due to self-focusing and filamentation of laser radiation in the reflected diffracting beams of each of the mode components is substantiated.

Conclusion. Under conditions of high-intensity laser processing by repetitively pulsed laser radiation with the TEM01 or TEM10 modes, 1D-dimensional VNSs are formed with a thickness at the base of up to 0.5 μm and a height of more than 1 μm , the composition of which can include both conductors, semiconductors, and their compounds. The resulting VNSs have a highly developed ordered surface structure, which may indicate that their application is promising.

Keywords: laser processing; pulse-periodic laser radiation; transverse modes of radiation; visco-like nanocomposite materials.

Funding: The study was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research within the framework of scientific project No. 19-32-90063\19 and the Ministry of Science and Education of the Russian Federation (g/z No. 0851-2020-0035) and within the framework of the strategic academic leadership program "Priority-2030" (Agreement No. 075-15-2021-1213).

Acknowledgment: The authors express their deep gratitude to M. I. Gozman for a detailed discussion of the mathematical aspects of relief processing, as well as a general discussion of the article.

Conflict of interest: The authors declare no apparent or potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Kopytov G. E., Stavtsev A. Yu., Kuzmenko A. P., Zhakin A. I., Filippov V. V., Neruchev Y. A.. Formation of Nanocomposite Structures under Laser Irradiation $\lambda = 1.064 \mu\text{m}$ DVD-R Coated with Aluminum Foil. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2023; 13(2): 120–135. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-2-120-135>

Received 28.02.2023

Accepted 20.04.2023

Published 30.05.2023

Введение

Уникальность свойств лазерного излучения (ЛИ) оказалась востребованной как в научном, так и в прикладном аспектах применительно к лазерной обработке (ЛО) материалов, когда отмечается активное формирование, преобразование и развитие их поверхностей с комплексом новых функциональных и эксплуатационных свойств [1–9]. Лазерная обработка материалов, достигаемая за счет эффективного термического воздействия, обусловленного высокой пространственной и спектральной локализацией ЛИ, открывает широкие перспективы задания упорядоченного микрорельефа с определённой фрактальной размерностью и повторяемостью [10–11]. Характерно, что структурирование с разными размерностями (0D,

1D, 2D и 3D) материалов при ЛО отмечается в независимости от их фазового состояния и характерно для жидкофазных [4], аморфных [5–6], твердофазных металлических [7–8] и керамических [9] агрегаций. Так при ЛО формируется минерал шаттукит [12] – 3D, нанопроволоки [13] и рост нанотрубок [14] – 1D, выращивания квазистеклообразных структур, продемонстрированная в работе [15]. Особый интерес представляет лазерная нанолитография (производство степперов нидерландской компанией ASML, японскими Canon и Nikon) как самостоятельная технология создания микрочипов. При модификации поверхностей на границах жидких фаз под действием ЛИ достигается управляемое динамическое перестроение оптических свойств [16]. В работах [17–18] сообщалось об экспериментальном по-

лучении упорядоченных висцероподобных структур на поверхности полимера. В целом, как и ранее [19–23], исследованиям и разработкам в этой области уделялось и продолжает уделяться значительное внимание. Так при лазерной абляции (ЛА) кремния в водной среде, когда под действием импульсов ЛИ с фемтосекундной длительностью формировались наночастицы (объекты с 0D-размерностью), изучена филаментация лазерного луча, вызванная его самофокусировкой, которая снижала результативность получения наночастиц. Однако для целого ряда других приложений как самофокусировка, так и филаментация ЛИ могут служить основой для структурирования материалов, включая формирование висцероподобных нанокомпозитных структур, что и стало предметом настоящей работы.

Материалы и методы

Образцами для ЛО служили пластины DVD-R-5, состоящие из двух пластинчатых слоев прозрачного поликарбоната (по 600 мкм). На внутренней стороне верхней из них созданы дорожки, форму и размер которых повторяют 2 буферных слоя из ZnS-SiO₂ с толщинами 10 и 5 мкм с размещенным между ними рабочим записывающим слоем из Ge-Sb-Te толщиной 5 мкм. На нижней пластине DVD-R-5 нанесен отражающий слой из Al 10 нм и связующий слой 50 мкм. Фактически между внешними пластинами поликарбоната создана дифракционная фазовая решётка с отражающим металлическим покрытием. Помимо этого поверхность пластины DVD-R-5 покрывалась алюминиевой фольгой (толщиной 30 мкм). Строение образца для наглядности проиллюстрировано на рисунке 1 и подробно описано в [17–18].

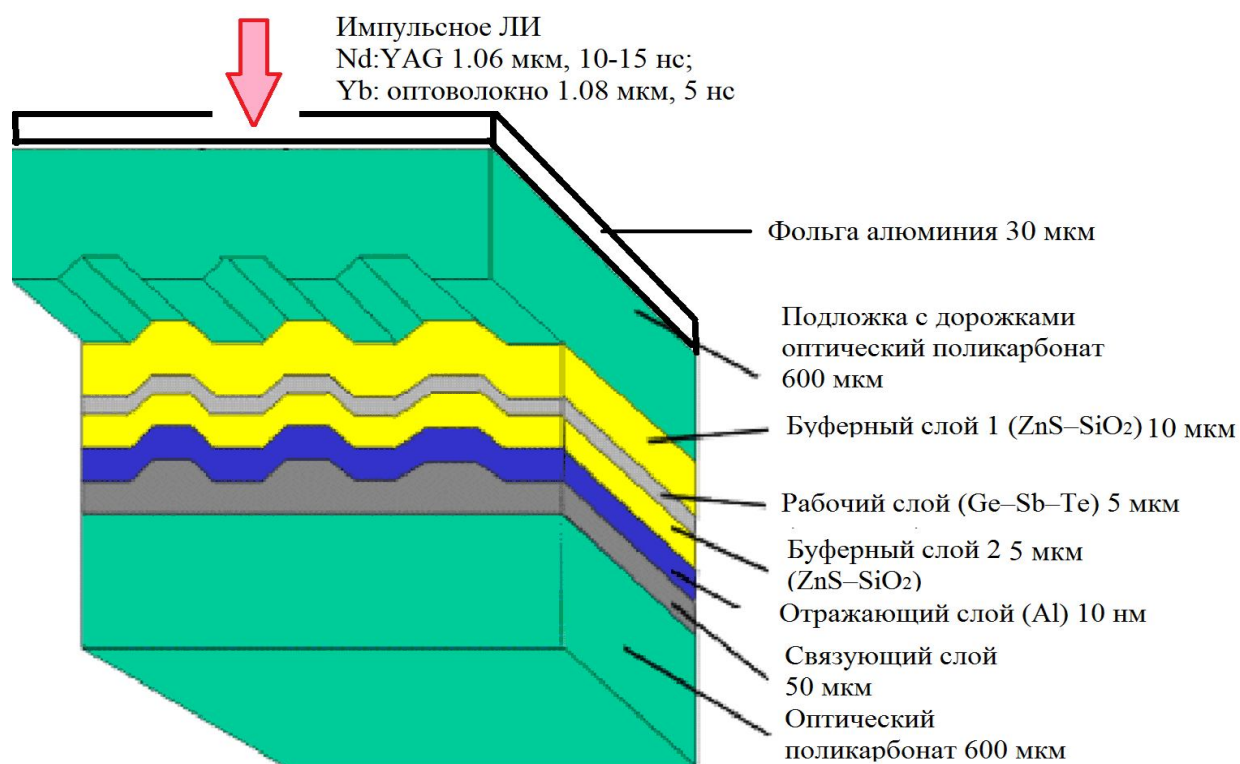


Рис. 1. Иллюстрация образца DVD-R-5 с алюминиевой фольгой на поверхности

Fig. 1. Illustration of a sample DVD-R-5 with aluminum foil on the surface

Источником ЛИ являлся некоммерческий импульсно-периодический твердотельный лазер на YAG: Nd³⁺ ($\lambda = 1,064$ мкм, $\tau_{\text{и}} = 10\text{--}15$ нс). Лазерное излучение имело поперечные моды типа TEM₁₀ или TEM₀₁. Лазерная обработка осуществлялась при перпендикулярном падении ЛИ к поверхности образца (рис. 1). По данным спектрофотометрического анализа (Perkin-Elmer Lambda 45) было установлено, что слои поликарбоната (толщиной 600 мкм) были полностью прозрачны на рабочей длине волны лазера. Для превращения энергии ЛИ в тепловую на внешней поверхности образца была приклеена тонкая алюминиевая фольга (толщиной 30 мкм), которая одновременно служила источником аблирующих микро- и наночастиц алюминия как в

атмосферу, так и в расплавленный в зоне ЛО поликарбонатный образец. Такую же роль мог выполнять и отражающий слой алюминия внутри DVD-R-5.

Для обработанного данным способом образца с помощью микроскопов: конфокального (КМ) Omega Scan, атомно-силовых (АСМ) Certus Light V “Nano Scan Tech” и AistNT и сканирующего электронного (СЭМ) JSM 6610 LV, JEOL – были изучены структурные изменения поверхности описанного образца после ЛО. Типичные изображения, возникающие при ЛО, представлены на рисунке 2. Отметим, что в предшествующих работах [17–18] проводилось лишь качественное описание изменений рельефа без проведения должного анализа и установления механизма их формирования.

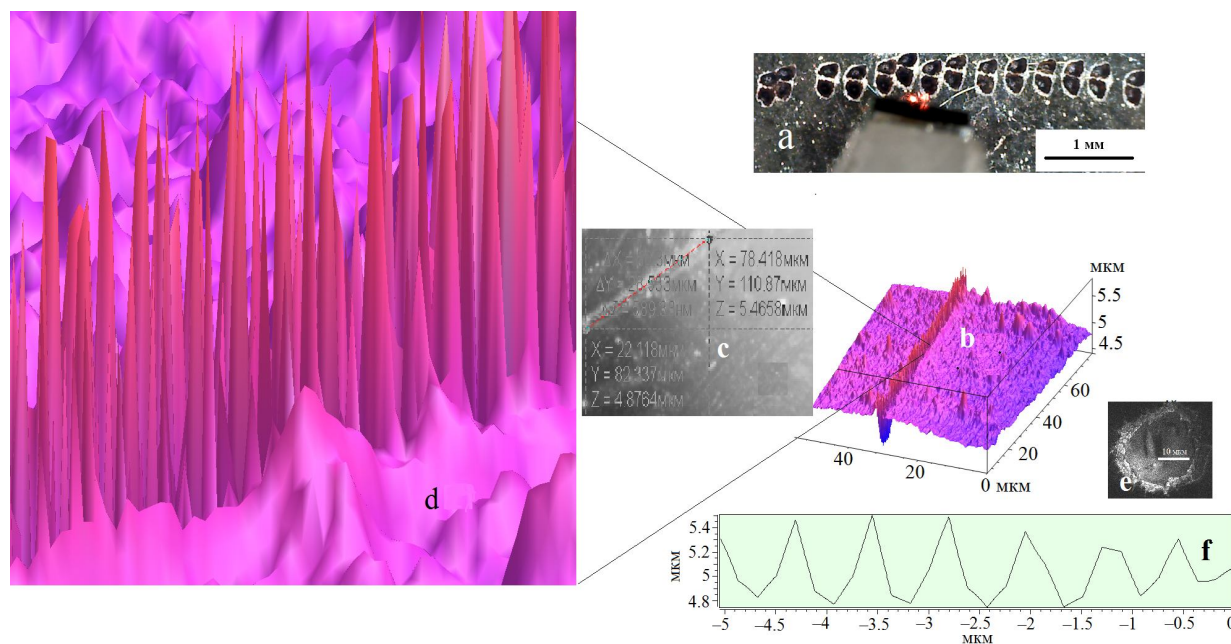


Рис. 2. Структурный анализ упорядоченного массива из ВНС: а – оптическое изображение последовательности следов обработки образцов серией импульсов ЛИ с TEM₁₀ или TEM₀₁; б – типичное АСМ-изображение; в – размерная характеристика ВНС; д – вид ВНС в выделенном фрагменте с увеличением $\times 75$; е – характерное СЭМ-изображение поверхности ЛО излучением с модой TEM₀₀; ф – типичный профиль участка упорядоченного массива ВНС

Fig. 2. Structural analysis of an ordered array of WNS: а – optical image of the sequence of traces of processing of samples by a series of laser pulses with TEM₁₀ or TEM₀₁; б – typical SPM image; в – dimensional characterization of WNS; д – characteristic view of the selected fragment with a magnification of $\times 75$; е – characteristic electron microscopic image of the laser treatment surface by TEM₀₀ LR; ф – typical section profile of the ordered array WNS

Оптическое КМ-изображение следов обработки серий импульсов от YAG: Nd³⁺, показанное на рисунке 2, а, соответствовало модам TEM₁₀ или TEM₀₁ с размерами порядка 200 мкм и расстоянием между ними ~40 мкм. АСМ-изображение структурированной поверхности образцов было получено в области 75×75 мкм на границах между двумя модами. Таким образом, анализировалась зона, включающая воздействие удвоенного пространственно-разделенного пучка ЛИ в соответствии с его модовым составом. Типичное АСМ-изображение приведено на рисунке 2, б. Для него было характерно формирование упорядоченного массива из микроразмерных структур, названных нами ВНС. Размеры ВНС проиллюстрированы АСМ изображением на рисунке 2, с, полученным с помощью программного обеспечения NSpec. В укрупненном масштабе с увеличением ×75 (с помощью электронного зума) приведено АСМ-изображение вида ВНС в выделенном фрагменте их упорядоченного массива (см. рис. 2, д). Отметим, что пики ВНС были не менее 1 мкм и имели наноразмерное острие. Латеральный размер, определяющий толщину ВНС, у основания достигал не более ~500 нм (см. рис. 2, д).

Для подтверждения однозначности вывода о формировании ВНС при ЛО указанного образца из пластины DVD-R-5 пучком ЛИ с модой TEM₁₀ или TEM₀₁ она была обработана с помощью оптоволоконного одномодового лазера с практически той же длиной волны излучения $\lambda = 1,081$ мкм с поперечной модой TEM₀₀. На рисунке 2, е приведено микроскопическое СЭМ-изображение места ЛО этого же образца, полученное на сканиру-

ющем электронном микроскопе JEOL JSM 6610 LV.

В соответствии с профилем ВНС у основания (см. рис. 2, ф) по данным АСМ латеральные размеры были одинаковыми и лежали в пределах ~0,5 мкм, что обусловлено расстоянием между интенсивностями в модах TEM₀₁ или TEM₁₀. Однако очевидно, что на формирование ВНС влияет прохождение каждой модовой составляющей сквозь материалы, находящиеся на оптическом пути, с существенно отличными плотностями (см. рис. 1). Это приводило к заметному отличию высот отдельных ВНС, прецизионно измеренных на АСМ (с точностью порядка 30 пм).

Фурье-анализ квазипериодичности полученных ВНС

Рост периодических структур на поверхности полупроводников при импульсном воздействии ЛИ наносекундной длительности наблюдался и ранее [1; 16–17]. Для анализа возникающих в процессе ЛО ВНС был проведен Фурье-анализ полученных АСМ-изображений (см. рис. 2, б).

Для анализа была выбрана высота рельефа поверхности с ВНС в зависимости от координат. Обозначим функцию поверхности $f(x, y)$ с микронной размерностью. Переменные x и y лежат в интервале от 0 до 75 мкм. Для дискретности с шагом 187,5 нм набор значений был задан аналитически в виде

$$\begin{aligned}x_i &= 75 \text{ мкм} \cdot (i - 1) / 399, \\y_j &= 75 \text{ мкм} \cdot (j - 1) / 399, 1 \leq i, j \leq 400.\end{aligned}$$

При таком задании масштабирования были построены ППФ и ОПФ, показанные на рисунках 3, а и с.

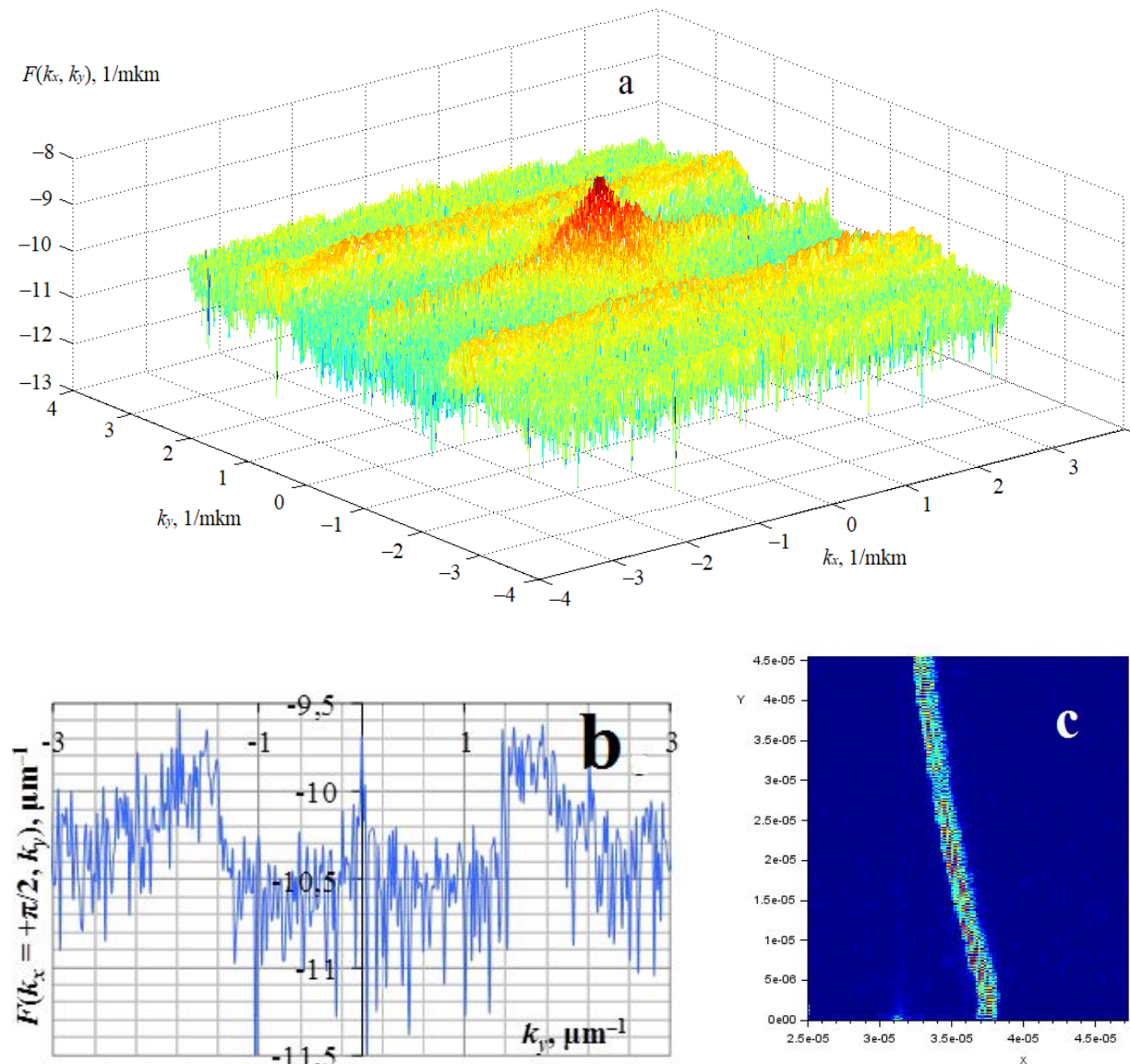


Рис. 3. ППФ для ЗСМ-изображения (вставка б на рис. 2): а – ППФ образ; б – срез Фурье-образа вдоль k_y при $k_x = +\pi/2$; с – восстановленное ОПФ изображение рельефа от Фурье-образа после обрезки

Fig. 3. DFT of the PSM image (fig. 2, b): а – DFT image; б – section of the Fourier-transform along k_y for $k_x = +\pi/2$; с – IFT reconstructed relief image from the Fourier-transform after cutting

Фурье-разложение проводилось по формуле

$$F(k_x, k_y) = \frac{1}{(400)^2} \times \sum_{i=1}^{400} \sum_{j=1}^{400} f(x_i, y_j) \exp(-I(k_x x_i - k_y y_j)). \quad (1)$$

Функции $F(k_x, k_y)$, как и $f(x, y)$, имели микронные размерности. Переменной

I была обозначена мнимая единица $I = (-1)^{1/2}$, т. к. i – индекс суммирования.

Число значений x и y , как и k_x и k_y , составляло 400, задавалось дискретно и имело расчетную погрешность менее 1%:

$$(k_x)_m = \frac{2\pi}{75 \text{ мкм}} \left(\frac{m}{400} - \frac{1}{2} \right), m = 1, 2, \dots, 400; \quad (2)$$

$$(k_y)_n = \frac{2\pi}{75 \text{ мкм}} \left(\frac{n}{400} - \frac{1}{2} \right), n = 1, 2, \dots, 400, (3)$$

т. е. k_x и k_y измерялись в обратных микронах в интервале $-\frac{\pi}{75 \text{ мкм}} < k_x$,

$$k_y \leq \frac{\pi}{75 \text{ мкм}} \text{ с шагом } \frac{\pi/200}{75 \text{ мкм}}.$$

На рисунке 3, а функция $F(k_x, k_y)$ имеет максимум вблизи точки $k_x = k_y = 0$, который отвечал за неровности большого размера. Это подтверждено видом поверхности $f(x, y)$ сбоку (см. рис. 2, б) и видом центрального максимума функции $F(k_x, k_y)$ в точке $k_x = k_y = 0$, которые при анализе пространственного распределения мелких пиков отбрасывались, т. к. были обусловлены аппаратными особенностями АСМ. Две светлые полосы в окрестности $0,02 < k_y < 0,03 \text{ мкм}^{-1}$ и $-0,03 < k_y < -0,02 \text{ мкм}^{-1}$ непосредственно свидетельствовали о квазипериодичности (см. рис. 3, а и б). На рисунке 3, б показан срез Фурье-образа вдоль k_y при $k_x = +\pi/2$, на котором отчётливо видны два максимума при значениях $k_y = \pm\pi/2$.

Для дополнительной проверки периодичности были выделены две полосы $-2,27/L_y < k_y < -1,32/L_y$ и $1,32/L_y < k_y < 2,27/L_y$, отвечающие за периодичность структуры. Интервалы изменений лежали для k_x от $-\pi/L_x$ до $+\pi/L_x$ и k_y от $-\pi/L_y$ до $+\pi/L_y$. В этих обозначениях L_y – полная длина исходного изображения (до преобразования Фурье) по оси Оу, равная 75 мкм. Внутри двух этих полос Фурье-образ $F(k_x, k_y)$ был неизменным. Все остальные значения $F(k_x, k_y)$ приняты за 0 всюду, кроме двух полос. Для такой обрезки Фурье-образа $F(k_x, k_y)$ было построено ОПФ (см. рис. 3, с), т. е. фактически был восстановлен исходный рельеф. Он совпал с профилем упорядоченного массива из микроразмерных структур

типа ВНС, сформированного при ЛО с (см. рис. 2, б и d).

В целом полученные результаты ППФ и ОПФ (см. рис. 3) свидетельствовали о периодичности ВНС, формируемых в процессе ЛО, что хорошо согласовывалось с видом исходного рельефа массива этих структур (см. рис. 2, б).

Был проведен статистический анализ наблюдаемого поверхностного рельефа (см. рис. 2, а) по следующему алгоритму определения распределений максимумов по площади, ширине и высоте ВНС:

1. Задание функции $f(x, y)$ для всех наблюдаемых локальных экстремумов (максимумов и минимумов).

2. Разбиение поверхности на области только с одним экстремумом и задание массивов координат для всех ближайших к нему точек $\{x_i, y_j\}$ и соответствующих значений $\{f(x_i, y_j)\}$.

3. Определение высоты m -го максимума по формуле $h_m = f_m^{\max} - f_m^{\min}$, где $f_m^{\max}$ – значение функции в m -м максимуме, $f_m^{\min} = \min\{f(x_i, y_j)\}$ – в области, относящейся к m -му максимуму.

4. По условию $f(x, y) > f_m^{\min} + h_m/2$ выбирались точки в окрестности m -го максимума. Так как в нашем случае площадь одного пикселя $S_{\text{pxl}} = (75 \text{ мкм}/400)^2$, то площадь m -го максимума с числом окружающих его точек N_m рассчитывалась по формуле $S_m = S_{\text{pxl}} N_m$.

5. Ширина m -го максимума площадью S_m на его полувысоте рассчитывалась по формуле $w_m = 2(S_m/\pi)^{1/2}$. Аналогично определялся диаметр круга.

Представленные на рисунке 4 распределения по указанным характерным размерам сформированных ВНС свидетельствовали об их достаточной гомогенности и воспроизводимости.

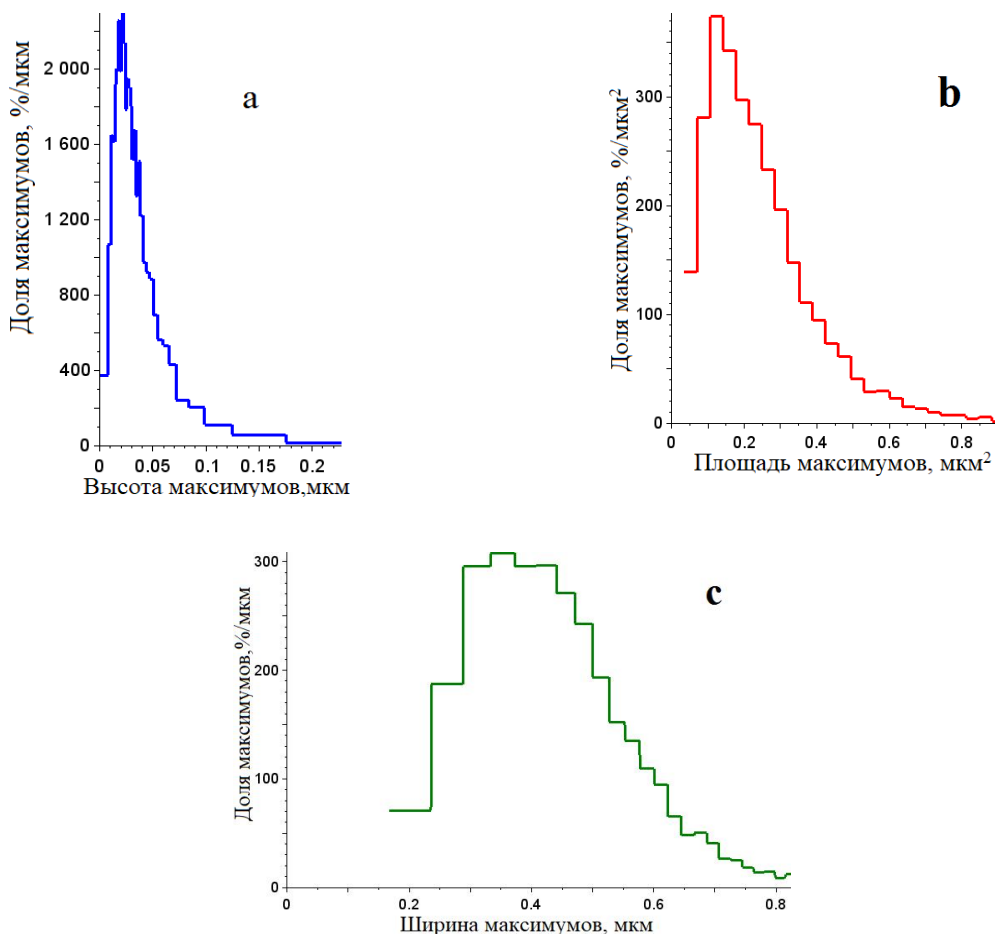


Рис. 4. Распределение размеров полученных структур по: а – высоте; б – площади; с – ширине на половине высоты

Fig. 4. The distribution of the sizes of the received structures on: a – height; b – area; c – width at half height

Результаты и их обсуждение

Для установления механизма формирования ВНС при ЛО учтем ее наиболее значимые параметры. Лазерное излучение (с модами TEM_{01} или TEM_{10} , см. рис. 2, а) фокусировалось в два пятна диаметрами порядка 200 мкм при расстоянии между ними ~40 мкм. Средняя мощность импульса ЛИ достигала 15 Вт, имела длительность 10–15 нс при частоте 3 кГц. Фактически интенсивность в фокусе каждой из мод достигала $I_0/2 \sim 200$ МВт/см², что могло давать скорость изменения температуры $dT/dt \sim 3 \cdot 10^{11}$ °/с. Падение ЛИ с плотностью потока $I_0/2$ на металлическую

фольгу из Al сопровождалось как отражением, так и поглощением.

Проведем анализ процессов ЛО с учетом выводов [24]. Коэффициент поглощения ЛИ на $\alpha \lambda = 1,064$ мкм в Al $\sim 0,07$ очень мал. Высокие температуропроводность a и теплопроводность λ_T Al и малая длительность ЛИ $\tau = 10 \dots 15$ нс обеспечивают достижение расчетной величины критической плотности потока для плавления Al $T_{пл} = 660^\circ\text{C}$:

$$I_1 = 0,885 T_{пл} \lambda_T / (a \tau)^{1/2} \sim 1,3 \cdot 10^5 \text{ Вт/см}^2, \quad (4)$$

величина которого оказывается значительно меньше $I_0/2$. Таким образом,

фольга из Al должна мгновенно проплавляться. Лазерное излучение пройдет через верхний слой из прозрачного поликарбоната (см. рис. 1) и будет воздействовать на нижележащие буферные слои из ZnS- и рабочий записывающий слой Ge-Sb-Te.

Помимо плавления при ЛО возникнут потери ЛИ на испарение Al при температуре кипения T_k :

$$I_2 = 0,885 T_k \lambda_T / (a\tau)^{1/2}. \quad (5)$$

При указанной выше начальной интенсивности ЛО $I_0/2$ скорости нагрева $v_n \sim (a/\tau)^{1/2}$ и испарения $v_{и} \sim I_3/(L_{исп} \rho)$ вполне могут сравняться. Отсюда можно рассчитать величину интенсивности ЛИ, теряемой на испарение I_3 :

$$I_3 \cong L_{исп} \rho (a/\tau)^{1/2} 2,7 \cdot 10^8 \text{ Вт/см}^2. \quad (6)$$

Фактически величина I_3 оказывается более чем в 1,5 раза меньше I_0 . Здесь $L_{исп} = 28,09 \text{ кДж/см}^2$ – удельная теплота испарения, а ρ – удельная плотность Al. Если учесть, что время электронно-решеточной релаксации в металлах составляет $\tau_{ЭР} \sim 10^{-10} \text{ с}$, то в условиях ЛО с $I_0 = 400 \text{ МВт/см}^2$ и $\tau_{и} \sim 10 \dots 15 \text{ нс}$ может вполне развиваться процесс абляции. Отметим, что помимо этого в зоне расплава могут наблюдаться медленно протекающие конвекционный, диффузионный, капиллярный и термокапиллярный механизмы [24] с временами протекания от 1 мкс до 1 мс. Однако их вклад не принимался во внимание, т. к. мог проявиться только за несопоставимо большее, по сравнению с $\tau_{и} = 10 \dots 15 \text{ нс}$, время. Таким образом, в упрощенном уравнении теплового баланса, учитывались нагрев, теплота испарения $L_{и}$ и скрытая теплота плавления $L_{пл}$ слоя поликарбоната толщиной 600 мкм в составе образца (см. рис. 1):

$$I_0 A = V_{пл} \rho (L_{и} + L_{пл} + C(T_{пл} - T_0)). \quad (7)$$

Влияние всех других слоев с микро-размерной толщиной в составе DVD-R-5

не учитывалось. Из (7) была оценена скорость перемещения фазовой границы плавления при ЛО:

$$V_{пл} = I_0 A / \rho (L_{и} + L_{пл} + C(T_{пл} - T_0)).$$

Отметим, что ее величина в этих нестационарных условиях оказалась выше скорости звука в поликарбонате 2280 м/с. Это означает, что на фронте ударной волны формировалось высокое давление. По оценке времени распространения волны плавления

$$t_{пл} = a\pi((\rho L_{пл} C(T_{пл} - T_0)/(2I_0 L_{пл}))^2$$

было получено, что ее нижняя граница по порядку величины практически совпала с $\tau_{и}$, составив $\sim 10^{-8} \text{ с}$. Подчеркнем, что расчетная оценка $t_{пл}$ процесса ЛО указывала на его адиабатический характер. В таких условиях высокоскоростного (адиабатического) нагрева температура могла превышать 3000°C , что фактически выше температур испарения или сублимации всех химических элементов и соединений в слоях DVD-R-5 (см. рис. 1).

Представленный анализ уравнения теплового баланса процессов при указанных условиях ЛО свидетельствовал о возможности формирования на основе поликарбонатной матрицы нанокompозитной смеси из микро- и наноразмерных частиц со строго сферической формой (минимум свободной энергии) из металлического Al, полупроводниковых элементов Ge, Te, Sb и соединений ZnS и SiO₂. При этом образовавшиеся частицы последовательно встраивались в расплав поликарбоната, выдавливаемый вверх.

Четкая локализация микро- и нанокompозитных структур в виде ВНС строго между двумя пятнами (с модами ТЕМ₀₁ или ТЕМ₁₀; см. рис. 2, а), возможно, происходила в поле дифрагирующих лучей (см. рис. 2, б), отражающихся от внутреннего алюминиевого слоя (см. рис. 1) в виде решетки, показанной на рисунках 1 и для расчета разности хода схематично

проиллюстрированной рисунком 5. В таких условиях рассеяние отраженных лучей сопровождалось как самофокусировкой ЛИ, так и филаментацией [2] с образованием (см. рис. 2, d) ВНС.

Для анализа роли явления дифракции ЛИ в процессе ЛО образцов DVD-R-5 использовалась схема хода лучей, проиллюстрированная рисунком дифракционной решётки в виде ступеней глубиной $h = 100$ нм, покрытых алюминиевой пленкой (см. рис. 1). Отраженные лучи обоих мод (TEM_{01} или TEM_{10}), как от нижних, так и от верхних плоскостей ступеней, со-

храняли когерентность. Согласно рисунку 5 запишем расчетную формулу разности хода лучей для проверки выполнимости условия дифракции:

$$\Delta = nh + nh/\cos\theta + nd\sin\theta = \pm m\lambda, \quad (8)$$

где $n = 1,585$ – показатель преломления поликарбоната (из-за малой толщины других слоев их n не учитывался); $d = 740$ нм – период решетки; $m = 0, 1, 2, \dots$ – целые числа. Дополнительные слагаемые в (8) учитывают отражения от нижней и верхней ступеней при нормальном падении ЛИ.

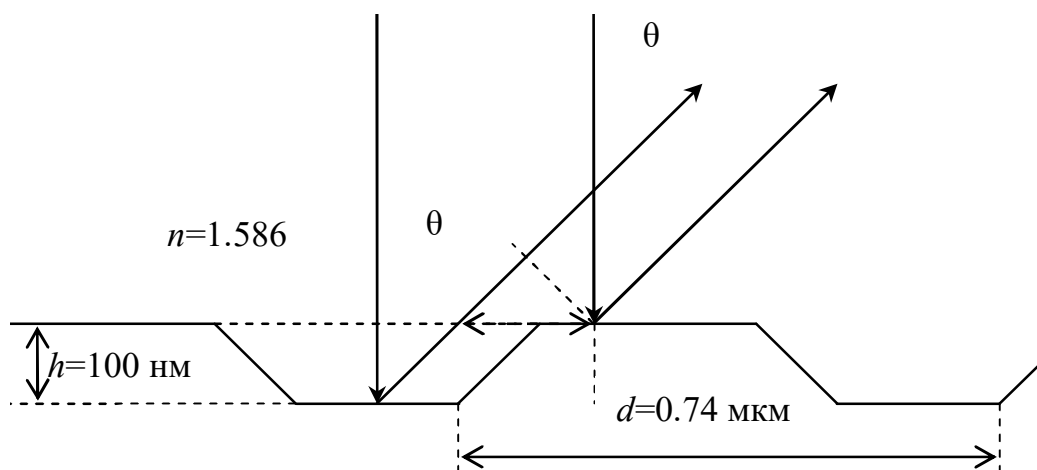


Рис. 5. К расчету разности хода лучей в ступенчатой отражающей дифракционной решётке

Fig. 5. On the calculation of the difference in the path of rays in a stepped reflective diffraction grating

Введением переменной $\cos\theta = y$ уравнение (8) преобразуется

$$n^2x^2y^3 + [(m\lambda)^2 - 2m\lambda nh - (nx)^2]y - 2mnh\lambda = 0. \quad (9)$$

Численное решение уравнения (9) по формулам Кардано при $m = 0$ даёт $\cos\theta = \pm 1$, т. е. в нулевом максимуме интенсивности прошедшего и отраженного ЛИ накладываются. При $m = 1$ и $\cos\theta = 0,8445$, соответственно $\theta = 32,3768^\circ$, что на толщине поликарбоната 600 мкм даёт боковое смещение луча от нормали на 380 мкм, т. е. в пределах диаметра пятен мод ЛИ TEM_{10} или TEM_{01} и перекры-

вается с ними. Кстати, такое решение отличается от расчёта по классической формуле для амплитудной дифракционной решётки с тем же периодом 0,74 мкм, где первый порядок отклонится на угол $64,73^\circ$. Смещение луча при таком отражении в первый порядок составит 1,27 мм и уже выходит за границы размеров обоих мод. Таким образом, наблюдаемый эффект образования ВНС является аддитивным результатом вклада как модового состава ЛИ, так и имеющей место дифракции. Отметим, что начиная с порядка $m = 2$ дифракция ЛИ перестает влиять на формирование ВНС.

Выводы

Обнаруженные ВНС, возникающие при импульсно-периодической ЛО с ЛИ с модами TEM_{10} или TEM_{01} , были проанализированы методами КМ, АСМ и СЭМ. Выполненный по АСМ-изображениям Фурье-анализ ППФ и ОПФ доказал периодичность упорядоченного массива из микроразмерных структур ВНС, что хорошо согласовывается с видом исходного рельефа массива этих структур. Сравнительно малая ширина на половине высоты гранулометрических распределений говорит о воспроизводимости размеров полу-

ченных структур. Анализ решений упрощенного уравнения теплового баланса показал, что процесс ЛО является адиабатическим, характеризуется сверхзвуковой скоростью распространения волны плавления. Под действием ударной волны и высокой температуры в зоне ЛО происходит испарение и абляция как поликарбоната, так и элементов в составе внутренних слоев DVD-R-5. Предложено, что рост ВНС обусловлен самофокусировкой и филаментацией ЛИ, отраженных и дифрагирующих лучей с модами TEM_{10} или TEM_{01} .

Список литературы

1. Аксёнов В. П., Журкин Б. Г. Образование периодической структуры при воздействии мощного когерентного излучения на поверхность полупроводников // Доклады АН СССР. 1982. Т. 265, № 6. С. 1365–1366.
2. Смирнов Н. А., Кудряшов С. И., Ионин А. А. Роль протяжённого филаментационного фокуса при абляции поверхности кремния в водной среде ультракороткими лазерными импульсами // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2022. Т. 162, вып. 1 (7). С. 55–59.
3. Grigoropoulos C. P. Laser synthesis and fictionalization of nanostructures // International Journal of Extreme Manufacturing. 2019. Vol. 1. P. 012002. <https://doi.org/10.1088/2631-7990/ab0eca>.
4. Kudryashov S. I., Lyon K., Allen S. D. Near-field thermal radiative transfer and thermoacoustic effects from vapor plumes produced by pulsed CO₂ laser ablation of bulk water // Journal of Applied Physics. 2006. Vol. 100(12). P. 124908. <http://dx.doi.org/10.1063/1.2402388>.
5. Zohuri B. Laser surface processing // Thermal effects of high power laser energy on materials. Springer Cham, 2021. P. 331–362. https://doi.org/10.1007/978-3-030-63064-5_6.
6. Honma T. Laser-induced crystal growth of nonlinear optical crystal on the glass surface // Journal of the Ceramic Society of Japan. 2010. Vol. 118(1374). P. 71–76. <https://doi.org/10.2109/jcersj2.118.71>.
7. Фемтосекундная запись субволновых одномерных квазипериодических наноструктур на поверхности титана / Е. В. Голосов, В. И. Емельянов, А. А. Ионин, Ю. Р. Колобов, С. И. Кудряшов, А. Е. Лигачёв, Ю. Н. Новосёлов, Л. В. Селезнёв, Д. В. Сеницын // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2009. Т. 90, вып. 2. С. 116–120.
8. Модификация поверхности титана импульсным лазерным излучением фемтосекундной длительности / Е. В. Голосов, В. И. Емельянов, А. А. Ионин, Ю. Р. Колобов, С. И. Кудряшов, А. Е. Лигачёв, Ю. Н. Новосёлов, Л. В. Селезнев, Д. В. Сеницын // Физика и химия обработки материалов. 2010. № 2. С. 10–14.
9. Nanosecond laser surface processing of AlN ceramics / Qibiao Yang, Yang Chen, Zhihui Lv, Lie Chen [et al.] // Journal of Materials Science. 2019. Vol. 54(6). P. 13874–13882. <https://doi.org/10.1007/s10853-019-03888-9>.

10. Соцков В. А. О явлениях самоорганизации в электрофизике макросистем // Журнал технической физики. 2009. Т. 79, вып. 8. С. 129–132.
11. Османов О. М. Наглядное моделирование фрактальных структур // Успехи физических наук. 1995. Т. 165, № 9. С. 1095–1097.
12. Shattuckite Synthesis and the Pattern Formation by the Scanning Laser Beam / S. Maximovskii, A. Turyanskiy, K. Bogonosov, S. Gizha, V. Senkov, I. Pirshin // *Tecnol. Metal. Mater. Miner.* 2016. Vol. 13, no. 3. P. 248–251. <http://dx.doi.org/10.4322/2176-1523.0988>.
13. Kiyotaka Miura, Kazuyuki Hirao, Yasuhiko Shimotsuma. Nanowire formation under femtosecond laser radiation in liquid // *Nanowires – Fundamental Research*; ed. by Abbas Hashim. Intech Open, 2011. <https://doi.org/10.5772/17720>.
14. Laser-Assisted Growth of t-Te Nanotubes and their Controlled Photo-induced Unzipping to ultrathin core-Te/sheath-TeO₂ / T. Vasileiadis, V. Dracopoulos, M. Kollia, S. N. Yannopoulos // *Nanowires. Scientific Reports*. 2013. Vol. 3. P. 1209. [https://doi.org/10.1038/srep01209\(2013\)](https://doi.org/10.1038/srep01209(2013)).
15. Квазистеклообразная наноструктура, изготовленная методом лазерной нанолитографии / И. И. Шишкин, К. Б. Самусев, М. В. Рыбин, М. В. Лимонов, Ю. С. Кишвар, А. Гайдукевичуте, Р. В. Киян, В. Н. Чичков // *Физика твёрдого тела*. 2012. Т. 54, вып. 10. С. 1852–1857.
16. Жаров А. А., Жарова Н. А. Светоиндуцированные дифракционные решётки на метаповерхностях на основе жидкого метаматериала // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. 2022. Т. 162, вып. 6 (12). С. 844–849.
17. Maximovsky S. N., Stavtsev A. U., Nedelkin V. I. Interaction of pulsed laser radiation with a polycarbonate-based composite // *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*. 2017. Vol. 44, no. 12. P. 374–379. <https://doi.org/10.3103/S1068335617120089>.
18. Maksimovsky S. N., Stavtsev A. Yu., Ovsyannikova A. V. Growth of coherent whiskers on polycarbonate substrates by laser radiation // *Journal of Russian Laser Research*. Vol. 40, no. 2. 2019. P. 197–204. <https://doi.org/10.1007/s10946-019-09789-1>.
19. Аскарьян Г. А., Мороз Е. П. Давление при испарении вещества в луче радиации // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. 1962. Т. 43, № 6. С. 2319–2320.
20. Аскарьян Г. А. Эффект самофокусировки // *Успехи физических наук*. 1973. Т. 111, вып. 2. С. 249–260.
21. Луговой В. Н., Прохоров А. М. Теория распространения мощного лазерного излучения в нелинейной среде // *Успехи физических наук*. 1973. Т. 111, вып. 2. С. 203–247.
22. Townes C. H. Self-trapping of optical beams // *Physical Review Letters*. 1964. Vol. 13, is. 15. P. 479.
23. Чао Р., Гаймар Е., Таунс К. Самофокусировка луча оптического мазера // *Действие лазерного излучения: сборник статей / пер. с англ. Ю. П. Райзер. М.: Мир, 1968. 187 с.*
24. Виноградов Б. А., Гавриленко В. Н., Либенсон М. Н. Теоретические основы воздействия лазерного излучения на материалы. Благовещенск: Благовещенский политехн. ин-т, 1993. 344 с.

References

1. Aksenov V. P., Zhurkin B. G. Obrazovanie periodicheskoi struktury pri vozeistvii moshchnogo kogerentnogo izlucheniya na poverkhnost' poluprovodnikov [Formation of a periodic structure under the influence of powerful coherent radiation on the surface of semiconductors].

Doklady AN SSSR = Reports of the USSR Academy of Sciences, 1982, vol. 265, no. 6. pp. 1365–1366.

2. Smirnov N. A., Kudryashov S. I., Ionin A. A. Rol' protyazhennogo filamentatsionnogo fokusa pri ablyatsii poverkhnosti kremniya v vodnoi srede ul'trakorotkimi lazernymi impul'sami [The role of an extended filament focus in the ablation of a silicon surface in an aqueous medium by ultrashort laser pulses]. *Zhurnal eksperimental'noi i teoreticheskoi fiziki = Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 2022, vol. 162, no. 1 (7), pp. 55–59.

3. Grigoropoulos C. P. Laser synthesis and fictionalization of nanostructures. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 2019, vol. 1, pp. 012002. <https://doi.org/10.1088/2631-7990/ab0eca>

4. Kudryashov S. I., Lyon K., Allen S. D. Near-field thermal radiative transfer and thermo acoustic effects from vapor plumes produced by pulsed CO₂ laser ablation of bulk water. *Journal of Applied Physics*, 2006, vol. 100(12), pp. 124908. <http://dx.doi.org/10.1063/1.2402388>

5. Zohuri B. Laser surface processing. Thermal effects of high power laser energy on materials. Springer Cham, 2021, pp. 331–362. https://doi.org/10.1007/978-3-030-63064-5_6.

6. Honma T. Laser-induced crystal growth of nonlinear optical crystal on the glass surface. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 2010, pp. 71–76. <https://doi.org/10.2109/jcersj2.118.71>

7. Golosov E. V., Emelyanov V. I., Ionin A. A., Kolobov Yu. R., Kudryashov S. I., Ligachev A. E., Novoselov Yu. N., Seleznev L. V., Sinitsyn D. V. Femtosekundnaya zapis' subvolnovykh odnomernykh kvaziperiodicheskikh nanostruktur na poverkhnosti titana [Femtosecond recording of subwavelength one-dimensional quasi-periodic nanostructures on a titanium surface]. *Pis'ma v Zhurnal eksperimental'noi i teoreticheskoi fiziki = JETP Letters*, 2009, vol. 90, is. 2, pp. 116–120.

8. Golosov E. V., Emelyanov V. I., Ionin A. A., Kolobov Yu. R., Kudryashov S. I., Ligachev A. E., Novoselov Yu. N., Seleznev L. V., Sinitsyn D. V. Modifikatsiya poverkhnosti titana impul'snym lazernym izlucheniem femtosekundnoi dlitel'nosti [Modification of the titanium surface by femtosecond pulsed laser radiation]. *Fizika i khimiya obrabotki materialov = Physics and chemistry of material processing*, 2010, no. 2, pp. 10–14.

9. Qibiao Yang, Yang Chen, Zhihui Lv, Lie Chen, eds. Nanosecond laser surface processing of AlN ceramics. *Journal of Materials Science*, 2019, vol. 54(6), pp. 13874–13882. <https://doi.org/10.1007/s10853-019-03888-9.76>

10. Sotskov V. A. O yavleniyakh samoorganizatsii v elektrofizike makrosistem [On the phenomena of self-organization in the electrophysics of macrosystems]. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki = Journal of Technical Physics*, 2009, vol. 79, no. 8, pp. 129–132.

11. Osmanov O. M. Naglyadnoe modelirovanie fraktal'nykh struktur [Visual modeling of fractal structures]. *Uspekhi fizicheskikh nauk = Successes of physical sciences*, 1995, vol. 165, no. 9, pp. 1095–1097.

12. Maximovskii S., Turyanskiy A., Bogonosov K., Gizha S., Senkov V., Pirshin I. Shattuckite synthesis and the pattern formation by the scanning laser beam. *Tecnol. Metal. Mater. Miner.*, 2016, vol. 13, no. 3, pp. 248–251. <http://dx.doi.org/10.4322/2176-1523.0988>

13. Kiyotaka Miura, Kazuyuki Hirao, Yasuhiko Shimotsuma. Nanowire formation under femtosecond laser radiation in liquid. *Nanowires – Fundamental Research*; ed. by Abbas Hashim. Intech Open, 2011. <https://doi.org/10.5772/17720>

14. Vasileiadis T., Dracopoulos V., Kollia M., Yannopoulos S. N. Laser-Assisted Growth of t-Te Nanotubes and their Controlled Photo-induced Unzipping to ultrathin core-Te/sheath-TeO₂. *Nanowires. Scientific Reports*, 2013, vol. 1209, pp. 1209. [https://doi.org/10.1038/srep01209\(2013\)](https://doi.org/10.1038/srep01209(2013))

15. Shishkin I. I., Samusev K. B., Rybin M. V., Limonov M. V., Kishvar Yu., Gajdukevichute A., Kiyan R. V., Chichkov V. N. Kvazistekloobraznaya nanostruktura, izgotovlennaya metodom lazernoi nanolitografii [Quasi-glass-like nanostructure made by laser nanolithography]. *Fizika tverdogo tela = Solid State Physics*, 2012, vol. 54, no. 10, pp. 1852–1857.
16. Zharov A. A., Zharova N. A. Svetoinducirovannyye difraktsionnye reshetki na metapoverkhnostyakh na osnove zhidkogo metamateriala [Light-induced diffraction gratings on metasurfaces based on liquid metamaterial]. *Zhurnal eksperimental'noi i teoreticheskoi fiziki = Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 2022, vol. 162, no. 6 (12). pp. 844–849.
17. Maximovsky S. N., Stavtsev A. U., Nedelkin V. I. Interaction of pulsed laser radiation with a polycarbonate-based composite. *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*, 2017, vol. 44, no. 12, pp. 374–379. <https://doi.org/10.3103/S1068335617120089>
18. Maksimovsky S. N., Stavtsev A. Yu., Ovsyannikova A. V. Growth of coherent whiskers on polycarbonate substrates by laser radiation. *Journal of Russian Laser Research*, 2019, vol. 40, no. 2, pp. 197–204. <https://doi.org/10.1007/s10946-019-09789-1>
19. Askaryan G. A., Moroz E. P. Davlenie pri isparenii veshchestva v luce radiatsii [The pressure during the evaporation of a substance in a beam of radiation]. *Zhurnal eksperimental'noi i teoreticheskoi fiziki = Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 1962, vol. 43, no. 6, pp. 2319–2320.
20. Askaryan G. A. Effekt samofokusirovki [Self-focusing effect]. *Uspekhi fizicheskikh nauk = Successes of Physical Sciences*, 1973, vol. 111, is. 2, pp. 249–260.
21. Lugovoi V. N., Prokhorov A. M. Teoriya rasprostraneniya moshchnogo lazernogo izlucheniya v nelineinoi srede [Theory of high-power laser radiation propagation in a nonlinear medium]. *Uspekhi fizicheskikh nauk = Successes of physical sciences*, 1973, vol. 111, is. 2, pp. 203–247.
22. Townes C. H. Self trapping of optical beams. *Physical Review Letters*, 1964, vol. 13, is. 15, p. 479.
23. Chao R., Gaimar E., Townes K. Samofokusirovka luchu opticheskogo mazera [Self-focusing of an optical maser beam]. *Deistvie lazernogo izlucheniya. Sbornik statei* [The action of laser radiation. Collection of articles]. Moscow, Mir Publ., 1968. 187 p.
24. Vinogradov B. A., Gavrilenko V. N., Libenson M. N. Teoreticheskie osnovy vozdeistviya lazernogo izlucheniya na materialy [Theoretical foundations of the impact of laser radiation on materials]. Blagoveshchensk, Blagoveshchensk Polytech, Institute Publ., 1993. 344 p.

Информация об авторах / Information about the Authors

Копытов Геннадий Филиппович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физики, Московский государственный университет технологий и управления им. К. Г. Разумовского (Первый казачий университет), г. Москва, Российская Федерация, e-mail: g137@mail.ru, ORCID: 0000-0003-1378-576X

Gennady P. Kopytov, Dr. of Sci. (Physics and Mathematics), Professor, Head of the Department of Physics, K. G. Razumovsky Moscow State University of Technologies and Management, Moscow, Russian Federation, e-mail: g137@mail.ru, ORCID: 0000-0003-1378-576X

Ставцев Алексей Юрьевич, старший преподаватель кафедры физики, Московский государственный университет технологий и управления им. К. Г. Разумовского (Первый казачий университет), г. Москва, Российская Федерация,
e-mail: a.stavtsev@mgutm.ru,
ORCID: 0000-0002-6942-2688

Кузьменко Александр Павлович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры нанотехнологий, микроэлектроники, общей и прикладной физики, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: apk3527@mail.ru,
ORCID: 0000-0001-7089-0692

Жакин Анатолий Иванович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры нанотехнологий, микроэлектроники, общей и прикладной физики, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: zhakin@mail.ru,
ORCID: 0000-0001-5635-8149

Филиппов Владимир Владимирович, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры математики и физики института естественных, математических и технических наук, Липецкий государственный педагогический университет имени П. П. Семенова-Тян-Шанского, г. Липецк, Российская Федерация,
e-mail: wwfilippow@mail.ru,
ORCID: 0000-0003-4323-351X

Неручев Юрий Анатольевич, доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики и нанотехнологий, научный руководитель научно-исследовательского центра физики конденсированного состояния, Курский государственный университет, г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: yuan2003@mail.ru,
ORCID: 0000-0002-8087-874X

Alexei Yu. Stavtsev, Senior Lecturer of the Department of Physics, K. G. Razumovsky Moscow State University of Technologies and Management, Moscow, Russian Federation,
e-mail: a.stavtsev@mgutm.ru,
ORCID: 0000-0002-6942-2688

Aleksandr P. Kuzmenko, Dr. of Sci. (Physics and Mathematics), Professor of the Department of Nanotechnology, Microelectronics, General and Applied Physics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: apk3527@mail.ru,
ORCID: 0000-0001-7089-0692

Anatoly I. Zhakin, Dr. of Sci. (Physics and Mathematics), Professor of the Department of Nanotechnology, Microelectronics, General and Applied Physics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: zhakin@mail.ru,
ORCID: 0000-0001-5635-8149

Vladimir V. Filippov, Dr. of Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Professor of the Department of Mathematics and Physics of the Institute of Natural, Mathematical and Technical Sciences, Lipetsk State Pedagogical University named after P. P. Semenov-Tyan-Shansky, Lipetsk, Russian Federation,
e-mail: wwfilippow@mail.ru,
ORCID: 0000-0003-4323-351X

Yury A. Neruchev, Dr. of Sci. (Physics and Mathematics), Professor of the Department of Physics and Nanotechnology, Scientific Supervisor of the Research Center for Condensed Matter Physics Kursk State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: yuan2003@mail.ru,
ORCID: 0000-0002-8087-874X