ГОРЕНИЕ И ВЗРЫВ, 2026. Том 19. №2. С. 124–141

ИЗУЧЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКИХ НАНОСТРУКТУР

Д. А. Антипов[1], Е. В. Бармина[2], П. С. Кулешов[3], А. С. Люлюшкина[4]

Аннотация: По фотографиям с электронного микроскопа анализируется периодический нанорельеф на металлической подложке, полученный лазерной абляцией. Изучаются и сравниваются распределения по размерам пространственных периодов нанорельефа (их наиболее вероятные значения и дисперсии) при разных способах обработки изображений (ручная статистика, спектральный Фурье-анализ, фильтры изображений, алгоритм выявления бинарных структур). Кроме того, даются аналитические оценки распределений. Исследуемые подложки выполнены в основном из титана и тантала. Сделан вывод об удовлетворительном соответствии характеристик распределений, определяемых различными методами обработки фотографий и полученных аналитически. Выработаны практические рекомендации по методам обработки.

Ключевые слова: распределения; наиболее вероятное значение; дисперсия; пространственный период; нанорельеф; наноструктура; лазерная абляция; спектр; бинаризация; преобразование Фурье

DOI: 10.30826/CE26190210 **EDN:** DLYJBH

Литература

1. *Emel'yanov V. I.* Kuramoto–Sivashinsky equation for modulation of surface relief of molten layer and formation of surface periodic microstructures under pulsed laser irradiation of solids // Laser Phys., 2011. Vol. 21. No. 1. P. 222–228.
2. *Khojasteh D., Khojasteh D., Kazerooni M., Salarian S., Kamali R.* Droplet impact on superhydrophobic surfaces: A review of recent developments // J. Ind. Eng. Chem., 2016. Vol. 42. P. 1–14.
3. *Ионин А. А., Кудряшов С. И., Левченко А. О. и др.* Гидродинамическая неустойчивость и самоорганизация субмикронного рельефа поверхности металлов при фемтосекундном лазерном облучении в жидкости // Письма в ЖЭТФ, 2017. Т. 106. № 4. С. 247–251.
4. *Kirichenko N. A., Barmina E. V., Shafeev G. A.* Theoretical and experimental investigation of the formation of high spatial frequency periodic structures on metal surfaces irradiated by ultrashort laser pulses // Phys. Wave Phenom., 2018. Vol. 26. No. 4. P. 264–273.
5. *Nastulavichus A. A., Kudryashov S. I., Smirnov N. A., Rudenko A. A., Kharin A. Yu., Zayarny D. A., Ionin A. A.* Nanosecond-laser plasma-mediated generation of colloidal solutions from silver films of variable thickness: Colloidal optical density versus pre-determined ablated mass // Opt. Laser Technol., 2019. Vol. 111. P. 75–80.
6. *Bonse J., Graf S.* Maxwell meets Marangoni — a review of theories on laser-induced periodic surface structures // Laser Photonics Rev., 2020. Vol. 14. Art. 2000215.
7. *Кулешов П. С., Кобцев В. Д.* Распределение кластеров алюминия и их воспламенение в воздухе при диспергации наночастиц алюминия в ударной волне // Физика горения и взрыва, 2020. Т. 56. № 5. С. 80–90.
8. *Миколуцкий С. И., Хомич Ю. В.* Влияние лазерного УФ излучения наносекундной длительности на структуру и адгезионные свойства металлов и сплавов // Физика металлов и металловедение, 2021. Т. 122. № 2. С. 159–165.
9. *Кулешов П. С., Кузнецов А. М., Кулешова Ю. Д.* Диспергация металлических нанопленок при лазерном сканировании // Вестник МГОУ. Сер. Физика–математика, 2022. № 1. С. 41–51.
10. *Кулешов П. С., Миколуцкий С. И., Хомич Ю. В.* Механизмы формирования поверхностного нанорельефа при лазерной абляции // ТВТ, 2024. Т. 62. Вып. 1. С. 112–120.
11. *Айыыжы К. О., Бармина Е. В., Кулешов П. С., Шафеев Г. А.* Эволюция отдельных фракций в распределениях металлических наночастиц при их лазерной фрагментации // Квантовая электроника, 2024. Т. 54. Вып. 10. С. 637–646.
12. *Новиков И. А., Ножницкий Ю. А., Шибаев С. А.* Мировой опыт в исследовании и применении технологического процесса лазерной ударной обработки

[1]Институт общей физики Российской академии наук им. Прохорова, antipov.dima.99@mail.ru
[2]Институт общей физики Российской академии наук им. Прохорова, barminaev@gmail.com
[3]Центральный институт авиационного моторостроения им. П. И. Баранова; Московский физико-технический институт (государственный университет), kuleshovps@yandex.ru
[4]Центральный институт авиационного моторостроения им. П. И. Баранова; Московский физико-технический институт (государственный университет), lulushkina.alina@phystech.edu

металлов (обзор) // Авиационные двигатели, 2022. № 2(15). С. 59–82.

13. *Ахманов С. А., Емельянов В. И., Коротеев Н. И., Семиногов В. Н.* Воздействие мощного лазерного излучения на поверхность полупроводников и металлов: нелинейно-оптические эффекты и нелинейно-оптическая диагностика // Успехи физических наук, 1985. Т. 147. № 12. С. 675–745. doi: 10.3367/UFNr.0147.198512b.0675.
14. *Либенсон М. Н.* Поверхностные электромагнитные волны оптического диапазона // Соросовский образовательный ж., 1996. Т. 10. С. 92–98.
15. *Borowiec A., Haugen H. K.* Subwavelength ripple formation on the surfaces of compound semiconductors irradiated with femtosecond laser pulses // Appl. Phys. Lett., 2003. Vol. 82. No. 25. P. 4462–4464.
16. *Dufft D., Rosenfeld A., Das S. K., et al.* Femtosecond laser-induced periodic surface structures revisited: A comparative study on ZnO // J. Appl. Phys., 2009. Vol. 105. No. 3. P. 034908-01–034908-9. doi: 10.1063/1.3074106.
17. *Martsinovskii G. A., Shandybina G. D., Smirnov D. S., et al.* Ultrashort excitations of surface polaritons and waveguide modes in semiconductors // Opt. Spectrosc., 2008. Vol. 105. No. 1. P. 67–72.
18. *Kudryashov S. I., Golosov E. V., Ionin A. A., et al.* Nanostructuring of solid surfaces by femtosecond laser pulses // AIP Conf. Proc., 2010. Vol. 1278. No. 1. P. 156–164.
19. *Reif J., Costache F., Henyk M., Pandelov S. V.* Ripples revisited: Non-classical morphology at the bottom of femtosecond laser ablation craters in transparent dielectrics // Appl. Surf. Sci., 2002. Vol. 197. P. 891–895.
20. *Bonse J., Höhm S., , Rosenfeld A., Krüger J.* Sub-100-nm laser-induced periodic surface structures upon irradiation of titanium by Ti: Sapphire femtosecond laser pulses in air // Appl. Phys. A — Mater., 2013. Vol. 110. No. 3. P. 547–551.
21. *Costache F., Henyk M., Reif J.* Surface patterning on insulators upon femtosecond laser ablation // Appl. Surf. Sci., 2003. Vol. 208. P. 486–491.
22. *Qi L., Nishii K., Namba Y.* Regular subwavelength surface structures induced by femtosecond laser pulses on stainless steel // Opt. Lett., 2009. Vol. 34. No. 12. P. 1846–1848.
23. *Höhm S., Rosenfeld A., Krüger J., Bonse J.* Femtosecond laser-induced periodic surface structures on silica // J. Appl. Phys., 2012. Vol. 112. No. 1. P. 014901. doi: 10.1063/1.4730902.
24. *Lang V., Rank A., Lasagni A. F.* Large area one-step fabrication of three-level multiple-scaled micro and nanostructured nickel sleeves for roll-to-roll hot embossing // Adv. Eng. Mater., 2017. Vol. 19. No. 8. P. 1700126.
25. *Giannuzzi G., Fraggelakis F., Gaudiuso C., et al.* Surface texturing of steel with bursts of femtosecond laser pulses // 19th Symposium (Internatinal) on Laser Precision Microfabrication Proceedings. — Osaka: Japan Laser Processing Society, 2018. Art. 18-005.
26. *Fraggelakis F., Mineuzzi G., Lopez J., et al.* Controlling micron and submicron scale laser induced surface structures on stainless steel with industrial femtosecond lasers // 19th Symposium (International) on Laser Precision Microfabrication Proceedings. — Osaka: Japan Laser Processing Society, 2018. Art. 18-019.
27. *Barmina E. V., Saveliev A. V., Shafeev G. A., Kudryashov S. I.* Laser nano-structuring of pre-structured substrates // J. Laser Micro Nanoen., 2018. Vol. 13. No. 1. P. 6–9.
28. *Collins T. J.* ImageJ for microscopy // BioTechniques, 2007. Vol. 43(1 Suppl). P. 25–30.
29. *Mallat S.* A wavelet tour of signal processing: The sparse way. — 3rd ed. — Burlington: Elsevier Inc., 2009. 832 p.
30. *Duda R. O., Hart P. E.* Use of the Hough transformation to detect lines and curves in pictures // Commun. ACM, 1972. Vol. 15. No. 1. P. 11–15.
31. *Sun C., Shrivastava A., Singh S., Gupta A.* Revisiting unreasonable effectiveness of data in deep learning era // Conference (International) on Computer Vision Proceedings. — IEEE, 2017. P. 843–852.
32. *Кулешов П. С., Бармина Е. В., Бруславский И. О.* О распределениях наноструктур по размерам при лазерном формировании рельефа // Неравновесные процессы / Под ред. С. М. Фролова, А. И. Ланшина. — М.: ТОРУС ПРЕСС, 2024. С. 87–90.
33. *Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.* Теоретическая физика. — 3-е изд. — М.: Наука, 1986. Т. 6. 738 с.
34. Физические величины: справочник / Под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. — М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
35. *Bradley D., Roth G.* Augumenting non-rigid objects with realistic lighting. — National Research Council of Canada, 2004. Technical Report NRC 47398.
36. *Гудмен Дж.* Введение в Фурье-оптику / Пер. с англ. — М.: Мир, 1970. 362 с. (*Goodman J. W.* Introduction to Fourier optics. — McGraw-Hill physical and quantum electronics ser. — San Francisco, CA, USA: McGraw-Hill, 1968. 287 p.)

Поступила в редакцию 27.01.2026
После доработки 12.03.2026
Принята к публикации 16.03.2026