

# Применение лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур для изготовления цифровых радужных голограмм

*М. К. Москвин, Е. В. Прокофьев, Н. А. Афанасьев, А. Р. Веласкес, Д. А. Синева, Г. В. Одинцова*  
Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

В работе представлен метод записи радужных голограмм на поверхности нержавеющей стали 08X18H10, основанный на формировании лазерно-индуцированных поверхностных периодических структур (ЛИППС). Под действием прямого излучения волоконного наносекундного лазера с длиной волны 1,06 мкм и частотой следования импульсов от 20 до 100 кГц были сформированы ЛИППС, представляющие собой модулированный рельеф с микронным периодом и высотой модуляции порядка 100 нм. Подбор параметров лазерного воздействия позволяет формировать как нерегулярные структуры, так и высокоупорядоченные решетки внутри лазерных отпечатков. Нерегулярные структуры могут выступать как случайные структурные элементы, а упорядоченные структуры формируют визуально наблюдаемые, плавно изменяющиеся цвета или цветовые оттенки, и элементы переключения цвета по изображению в зависимости от ракурсов наблюдения.

*Ключевые слова:* Радужная голограмма, Лазерно-индуцированные поверхностные периодические структуры (ЛИППС), Нержавеющая сталь.

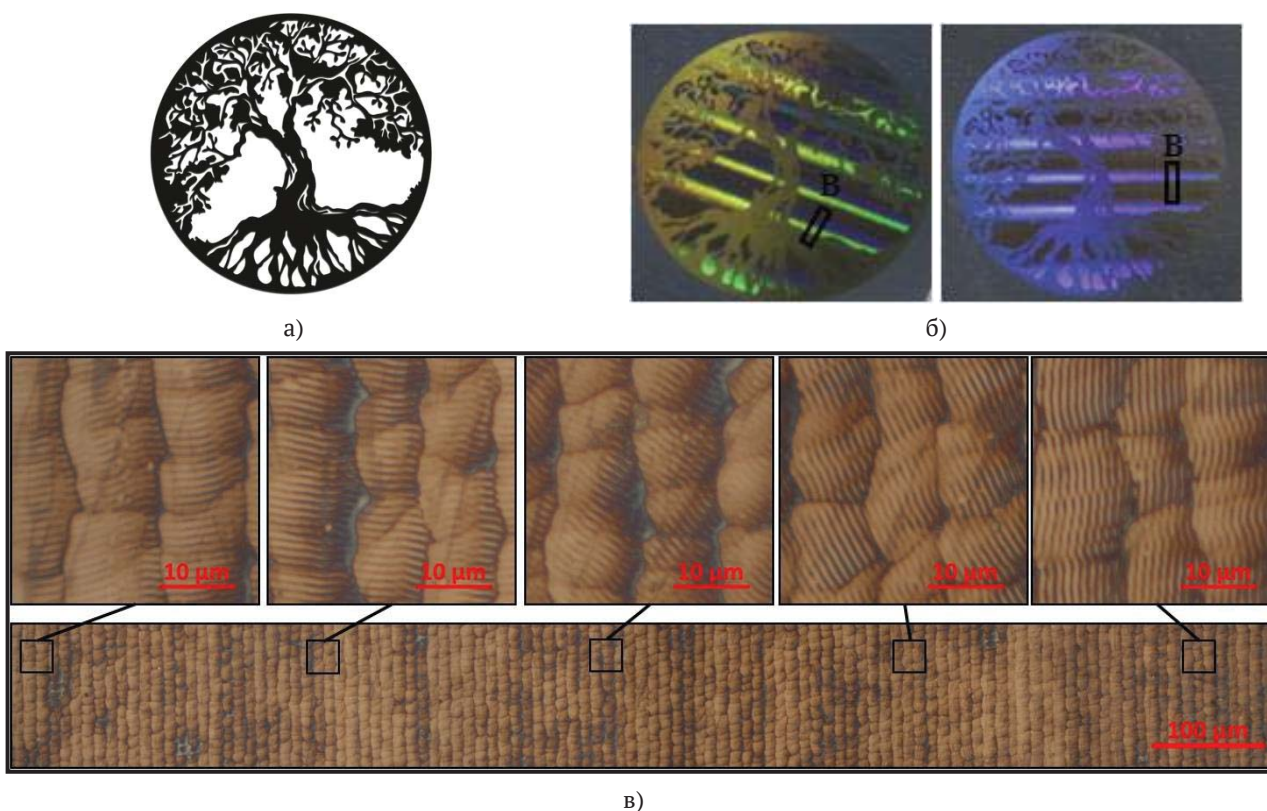
*Цитирование:* Москвин, М. К. Применение лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур для изготовления цифровых радужных голограмм / М. К. Москвин, Е. В. Прокофьев, Н. А. Афанасьев, А. Р. Веласкес, Д. А. Синева, Г. В. Одинцова // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 207–210.

Впервые лазерно-индуцированные поверхностные периодические структуры (ЛИППС) наблюдались Бирнбаумом в 1965 году [1]. ЛИППС формируются вследствие интерференции падающей волны и возбужденной поверхностной электромагнитной волны на шероховатостях поверхности [2]. Управляя параметрами лазерного воздействия возможно контролировать глубину, период и ориентацию ЛИППС. Пространственную ориентацию ЛИППС возможно регулировать, изменяя направление поляризации лазерного излучения [3], период — изменяя угол падения излучения [4], а глубины структур — управляя плотностью энергии [5]. Данные структуры были получены на поверхности всех типов материалов: металлах [6], полупроводниках [7], диэлектриках [8] и полимерах [9]. В последнее время ЛИППС находят свое применение во многих отраслях науки и техники благодаря возможности функционализации поверхности, а именно управление смачиваемостью [10,11], оптическими [12] и триоблогическими свойствами поверхности [13], а также ЛИППС способствует пролиферации и миграции клеток [14].

В настоящей работе мы рассматриваем оптические свойства поверхностного слоя функционального материала (поверхности нержавеющей стали) со сформированным покрытием на основе ЛИППС и их применение для записи радужных голограмм на. Эксперименты проводились на пластинах нержавеющей стали 08X18H10, толщина пластинки

составляла 0,5 мм, средняя шероховатость поверхности  $R_a = 0,02$  мкм,  $R_z = 0,18$  мкм. Лазерное воздействие проводилось на воздухе при нормальных условиях при помощи волоконного наносекундного импульсного лазера с длиной волны  $\lambda = 1064$  нм, длительностью импульса от 4 до 100 нс, частотой следования импульсов от 20 до 100 кГц в технологической лазерной установке МиниМаркер 2-20А4 (ООО «Лазерный Центр», Россия). Состояние поляризации контролировалось при помощи дополнительно установленной призмы Глана-Тейлора, работающей как линейный поляризатор, и установленных полуволновой пластинки или четвертьволновой пластинки. Пучок входил в систему двухосевого гальвосканера и попадал на объектив плоского поля (фокусное расстояние 216 мм). Диаметр пучка в области обработки на уровне  $1/e^2$  составлял порядка 50 мкм. Полуволновая пластинка устанавливалась на круговой вращатель, синхронизированный с гальвосканером для контроля направления линейной поляризации излучения. Было реализовано два режима сканирования. Первый – поляризация неизменна во время сканирования, что позволяет формировать области любой конфигурации с неизменной ориентацией структур. Второй – вращение линейной поляризацией с постоянной скоростью во время лазерного сканирования, что позволяет формировать области с плавным изменением пространственной ориентации структур. Четвертьволновая пластинка использовалась для изменения поляризации излучения от линейной к круговой поляризации и записи случайного структурного элемента.

Для записи итоговой радужной голограммы на поверхности стали было использовано растровое изображение, результат записи показан рис. 1. Оптимальные параметры записи составили,  $\tau = 50$  нс, скорость повторения импульса  $\nu = 35$  кГц, скорость сканирования  $V = 35$  мм/с, шаг сканирования  $d = 5$  мкм и плотность энергии в лазерном импульсе  $E = 3,5$  Дж/см<sup>2</sup>, плотность мощности составила  $q = 6 \cdot 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>. Вводное изображение поделено на слои сканирования. Каждый цвет обеспечивает уникальную пространственную ориентацию ЛИППС в отдельном сегменте изображения. Градиент цвета соответствует плавному изменению ориентацию ЛИППС, что было достигнуто непрерывным поворотом линейной поляризации, с круговой скоростью вращения 2 град/с, во время лазерного сканирования.



**Рис. 1.** Радужная голограммы на поверхности нержавеющей стали 08X18H10: а) входное растровое изображение; б) записанное изображение на поверхности стали 08X18H10, в) микрофотография области с изменением пространственной ориентации ЛИППС

Предложен метод прямой лазерной записи изображений за счет формирования ЛИППС на поверхности нержавеющей стали. Данный метод представляет интерес для создания радужных голограмм, интегрированных в металлические изделия. Тщательный контроль параметров лазерного воздействия позволяет формировать как нерегулярные структуры внутри лазерных отпечатков, так и высоко упорядоченные решетки. Нерегулярные структуры могут выступать как случайные структурные элементы, а упорядоченные структуры формируют визуально наблюдаемые, плавно изменяющиеся цвета или цветовые оттенки и элементы переключения цвета по изображению в зависимости от ракурсов наблюдения.

### Благодарность

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда, Проект № 21-79-10241

### Список источников

- [1] Birnbaum M. Semiconductor surface damage produced by ruby lasers //Journal of Applied Physics. – 1965. – Т. 36. – №. 11. – С. 3688-3689.
- [2] Bonse J. et al. Laser-induced periodic surface structures—A scientific evergreen // IEEE Journal of selected topics in quantum electronics. – 2016. – Т. 23. – №. 3.
- [3] Dusser B. et al. Controlled nanostructures formation by ultra fast laser pulses for color marking // Optics express. – 2010. – Т. 18. – №. 3. – С. 2913-2924.

- [4] Ionin A. A. et al. Femtosecond laser color marking of metal and semiconductor surfaces // Applied Physics A. – 2012. – T. 107. – №. 2. – C. 301-305.
- [5] Tan B., Venkatakrishnan K. A femtosecond laser-induced periodical surface structure on crystalline silicon // Journal of Micromechanics and Microengineering. – 2006. – T. 16. – №. 5. – C. 1080.
- [6] Vorobyev A. Y., Guo C. Effects of nanostructure-covered femtosecond laser-induced periodic surface structures on optical absorptance of metals // Applied Physics A. – 2007. – T. 86. – №. 3. – C. 321-324
- [7] Bonse J. et al. Femtosecond laser-induced periodic surface structures // Journal of Laser Applications. – 2012. – T. 24. – №. 4. – C. 042006.
- [8] Gräf S., Kunz C., Müller F. A. Formation and properties of laser-induced periodic surface structures on different glasses // Materials. – 2017. – T. 10. – №. 8. – C. 933.
- [9] Rebollar E., Castillejo M., Ezquerro T. A. Laser induced periodic surface structures on polymer films: From fundamentals to applications // European Polymer Journal. – 2015. – T. 73. – C. 162-174.
- [10] Long J. et al. Superhydrophobic and colorful copper surfaces fabricated by picosecond laser induced periodic nanostructures // Applied Surface Science. – 2014. – T. 311. – C. 461-467.
- [11] Zhang Y. et al. Vacuum brazing of alumina to stainless steel using femtosecond laser patterned periodic surface structure // Materials Science and Engineering: A. – 2016. – T. 662. – C. 178-184.
- [12] Vorobyev A. Y., Guo C. Colorizing metals with femtosecond laser pulses // Applied Physics Letters. – 2008. – T. 92. – №. 4. – C. 041914.
- [13] Bonse J. et al. Tribological performance of sub-100-nm femtosecond laser-induced periodic surface structures on titanium // Applied Surface Science. – 2016. – T. 374. – C. 190-196.
- [14] Martínez-Calderon M. et al. Surface micro- and nano-texturing of stainless steel by femtosecond laser for the control of cell migration // Scientific reports. – 2016. – T. 6. – №. 1. – C. 1-10.

## **Application of laser-induced periodic surface structures for the design of digital rainbow holograms**

*M. Moskvina, E. Prokofiev, N. Afanasev, A. Velazquez, D. Sinev, G. Odintsova*

ITMO University, Saint Petersburg, Russia

A method of forming iridescent holograms on the surface of stainless steel 08X18H10 based on the formation of laser-induced periodic surface structures (LIPSS) is presented in this report. LIPSS were shaped by direct irradiation of a nanosecond fiber laser with a wavelength of 1.06  $\mu\text{m}$  and a pulse repetition frequency of 20 to 100 kHz. The structures exhibit surface relief modulations with one micron periods and height relief of about 100 nm. Proper selection of the parameters allows to obtain high-ordered gratings and random structures inside the laser spots. Firstly, random structures can act as a fingerprint of the structural elements of an image. Secondly, high-order structures enable the formation of visually observable, smoothly changing colors, or color shades, and elements of color switching across the image depending on the viewing angles.

*Keywords:* Rainbow hologram, Laser-induced periodic surface structures (LIPSS), Stainless steel.