

Оптический журнал

Лазерные технологии
Laser technologies

DOI: 10.17586/1023-5086-2023-90-04-18-34

УДК 535.421

Лазерное формирование периодических структур как метод одноэтапного синтеза защитных голограмм

Михаил Константинович Москвин¹✉, Надежда Николаевна Щедрина²,
Артур Джуракулович Долгополов³, Евгений Витальевич Прокофьев⁴,
Валерий Витальевич Романов⁵, Дмитрий Андреевич Синев⁶,
Вадим Павлович Вейко⁷, Галина Викторовна Одинцова⁸

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

¹ mkmoskvin@itmo.ru	https://orcid.org/0000-0001-7399-7022
² schedrina.nadezda@itmo.ru	https://orcid.org/0000-0002-1517-1043
³ addolgopolov@itmo.ru	https://orcid.org/0000-0002-9548-791X
⁴ zhenya.prokofev.1998@mail.ru	https://orcid.org/0000-0002-1048-6038
⁵ vvromanov@itmo.ru	https://orcid.org/0000-0003-1468-9438
⁶ sinev@itmo.ru	https://orcid.org/0000-0002-6274-1491
⁷ vpveiko@itmo.ru	https://orcid.org/0000-0001-6071-3449
⁸ gvodintsova@itmo.ru	https://orcid.org/0000-0001-9581-4290

Аннотация

Предмет исследования. В работе исследованы методы формирования топологии элементов на основе лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур для реализации различных визуальных эффектов и структурных признаков в защитной голограмме, записанной непосредственно на поверхности нержавеющей стали AISI 430. **Цель работы.** Оптимизация процесса записи изображений с помощью лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур на массивном металле при создании динамических изображений для решения задач защитной голографии. **Метод.** Метод основан на формировании лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур под воздействием сканирующего лазерного излучения при одновременном повороте поляризации лазерного излучения. Процесс записи реализован при помощи излучения волоконного наносекундного лазера с длиной волны 1,064 мкм в 2-х координатной сканирующей системе с объективом плоского поля. **Основные результаты.** Разработана методика создания защитной голограммы, состоящей из набора элементарных ячеек, заполненных дифракционными микрорешётками с различной пространственной ориентацией. Выявлены основные факторы влияния на пространственную ориентацию лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур при формировании структур с заданной топологией и наблюдаемыми визуальными динамическими эффектами на основе элементарных дифракционных микрорешётках: поляризация излучения и траектория сканирования пучка. Показано, что период дифракционных микрорешёток в рассматриваемом случае составляет около 1 мкм и равен длине волны воздействующего лазерного излучения. **Практическая значимость.** Предложенный в работе метод формирования дифракционных микрорешёток позволяет получать голографические элементы/изображения с различной пространственной топологией, различными визуальными и структурными признаками, отвечающими требованиям, предъявляемым к современным защитным голограммам в основных областях их применения.

Ключевые слова: лазерно-индуцированные периодические поверхностные структуры, защитная голограмма, дифракционная решётка

Благодарность: исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (Проект № 21-79-10241).

Ссылка для цитирования: Москвин М.К., Щедрина Н.Н., Долгополов А.Д., Прокофьев Е.В., Романов В.В., Синев Д.А., Вейко В.П., Одинцова Г.В. Лазерное формирование периодических структур как метод одноэтапного синтеза защитных голограмм // Оптический журнал. 2023. Т. 90. № 4. С. 18–34. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-04-18-34>

Коды OCIS: 090.5640. 050.1950.

Periodic structures laser formation as a method of one-stage production of security holograms

MIKHAIL MOSKVIN¹✉, NADEZHDA SHCHEDRINA², ARTHUR DOLGOPOLOV³, EVGENY PROKOFIEV⁴, VALERY ROMANOV⁵, DMITRY SINEV⁶, VADIM VEIKO⁷, GALINA ODINTSOVA⁸

ITMO University, Saint-Petersburg, Russia

¹mkmoskin@itmo.ru <https://orcid.org/0000-0001-7399-7022>

²schedrina.nadezda@itmo.ru <https://orcid.org/0000-0002-1517-1043>

³addolgopolov@itmo.ru <https://orcid.org/0000-0002-9548-791X>

⁴zhenya.prokofev.1998@mail.ru <https://orcid.org/0000-0002-1048-6038>

⁵vvromanov@itmo.ru <https://orcid.org/0000-0003-1468-9438>

⁶sinev@itmo.ru <https://orcid.org/0000-0002-6274-1491>

⁷vpveiko@itmo.ru <https://orcid.org/0000-0001-6071-3449>

⁸gvodintsova@itmo.ru <https://orcid.org/0000-0001-9581-4290>

Abstract

Subject of study. In this paper, methods of topology formation of elements based on laser-induced periodic surface structures for the implementation of various visual effects and structural features in a security hologram recorded directly on the surface of AISI 430 stainless steel are studied. **The purpose of the work.** The process optimization of recording images based on laser-induced periodic surface structures on bulk metal for creating dynamic images for solving problems of security holography. **Method.** The method is based on the formation of laser-induced periodic surface structures under the action of scanning laser radiation with simultaneous rotation of the polarization of laser radiation. The recording process is implemented using nanosecond fiber laser radiation with 1.064 μm wavelength, in a 2-dimensional scanning system with a flat field objective. **Main results.** A technique has been developed for creating a protective hologram consisting of a set of laser prints filled with diffractive microgratings with different spatial orientations. The main factors of influence on the laser-induced periodic surface structures spatial orientation during the formation of structures with a given topology and observed visual dynamic effects based on elementary diffractive microgratings are revealed: radiation polarization and beam scanning trajectory. It is shown that the period of micro-diffraction gratings is equal to the wavelength of the acting laser radiation and is about 1 μm. **Practical significance.** The method proposed in this work for the elementary diffractive microgratings formation makes it possible to obtain holographic elements/images with different spatial topology, various visual and structural features which meet the requirements for modern security holograms in their main areas of application.

Keywords: laser-induced periodic surface structures, security hologram, diffraction grating

Acknowledgment: the study was supported by the Russian Science Foundation (Project № 21-79-10241).

For citation: Москвин М.К., Шхедрина Н.Н., Долгополов А.Д., Прокофьев Е.В., Романов В.В., Синев Д.А., Вейко В.П., Одинцова В.П. Периодические структуры лазерного формирования как метод одностадийного синтеза защитных голограмм [In Russia] // Оптический журнал. 2023. В. 90. № 4. П. 18–34. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-04-18-34>

OCIS codes: 090.5640. 050.1950.

ВВЕДЕНИЕ

Поиск новых методов формирования защитных знаков на продукции, подлежащей защите от фальсификации и охране авторских, интеллектуальных прав, представляет собой актуальную научную проблему во многих практических приложениях. В настоящее время для различия оригинальной и контрафактной продукции во всём мире успешно применяются защитные голограммы, восстанавливающие в белом свете изображения с заранее заданными визуальными признаками. Основой защитных свойств в этом случае является изобразительная голография, принципы которой были заложены в работах Ю.Н. Денисюка [1], Д. Габора [2], Э. Лейта [3].

В продолжение этих идей защитная голография получила дальнейшее развитие за счёт массового тиражирования методом тиснения при создании радужных голограмм Бентона [4]. Важнейшим этапом в производстве защитных голограмм является расчёт и запись элементарных дифракционных решёток, на основе которых формируется большая часть защитных визуальных признаков. Цифровые методы получения защитных голограмм позволяют проектировать разнообразные голографические элементы путём компьютерного синтеза, не требуя наличия физической модели предмета голограммы. Распространёнными методами записи защитных голограмм являются технология дот-матрикс [5, 6] и электронно-лучевая литография [7, 8]. Однако со всеми преимуществами численных методов, проектирование и запись одной оригинальной голограммы всё ещё требует больших времён и трудозатрат. Процесс очень чувствителен к условиям записи, присутствие нежелательного света и вибраций приводит к размытию голографических изображений, а требующаяся постэкспозиционная обработка голограмм (усиливающие изображение и фиксирующие голограмму) ещё более усложняет процесс массового тиражирования.

Альтернативными методами формирования защитных голограмм являются технологии прямой лазерной записи, позволяющие исключить технологические процессы, связанные с постэкспозиционной обработкой, и производить запись на множестве материалов в одностадийном процессе. В работе [9] авторами предложен метод создания защитных

фазовых голограмм на стали при помощи микрократеров, которые образуются сфокусированным лазерным пучком. Другим простым способом создания микронных и субмикронных структур является применение гравировки с использованием многолучевой лазерной интерференции [10]. Однако для эффективного применения этого метода требуются сложные оптические системы, хотя современные интерференционные головки и позволяют записывать элементы различной топологии с периодом структур от единиц до сотен микрон [11, 12].

Перспективным способом лазерной обработки является формирование лазерно-индущированных периодических поверхностных структур (ЛИППС), которые позволяют записывать в однолучевой схеме микро- и наноразмерные структуры. Впервые ЛИППС наблюдались М. Бирнбаумом в 1965 году [13]. На сегодняшний день процессы формирования ЛИППС объясняют появлением периодического профиля интенсивности света (за счёт возбуждения поверхностной электромагнитной волны и её интерференции с падающей волной) и последующей реорганизацией материала в результате протекания термических, термомеханических и гидродинамических процессов при воздействии периодически модулированного лазерного излучения [14, 15, 16, 17].

Известно, что, управляя параметрами лазерного воздействия, можно контролировать глубину, период и ориентацию ЛИППС. Пространственную ориентацию ЛИППС возможно также регулировать, изменяя направление и поляризацию лазерного излучения [18], период — изменяя длину волны и угол падения излучения [19], а глубины структур — изменяя плотность энергии [20]. ЛИППС были ранее получены на различных материалах: металлах [21], полупроводниках [22], диэлектриках [23] и полимерах [24].

В последнее время ЛИППС находят своё применение во многих отраслях науки и техники, благодаря широким возможностям функционализации поверхностей: позволяя управлять смачиваемостью [25, 26], оптическими [27], трибологическими [28] и другими свойствами поверхности, например пролиферацией и миграцией клеток [29]. Способность управлять цветом поверхности за счёт ЛИППС наблюдалась в ряде статей [19, 30, 31, 32, 33, 34].

В работе [18] была показана возможность достижения чётко определённого структурного цвета при помощи точного контроля пространственной ориентации ЛИППС путём изменения направления линейной поляризации лазерного излучения при помощи полуволновой пластиинки. В работе [35] авторы демонстрируют голограммические изображения с линейными и радиальными цветовыми рефлексами, достигаемые за счёт непрерывного поворота полуволновой пластиинки во время сканирования. В работе [36] предложено использование пространственно-светового модулятора (Spatial Light Modulator) для переключения направления ЛИППС в изображении записываемой голограммы. В работе [37] применяется жидкокристаллический поляризатор для этих целей и реализована обработка деталей свободной формы при установке образца на 5-ти осевой позиционер.

Путём создания различных топологий ЛИППС возможно создание цветных статичных и динамичных изображений, что открывает обширный потенциал в приложениях на основе защитных голограмм, где ЛИППС действуют как элементарная дифракционная решётка, позволяя формировать как визуальные, так и скрытые защитные признаки.

К визуальным признакам относятся [38]:

- 1) многоцветные изображения, цветные элементы, элементы с плавно изменяющейся цветовой гаммой;
- 2) эффект смены нескольких изображений, свитч-эффект переключения изображений при различных углах наблюдения;
- 3) эффекты динамики, кинограммы — эффект анимации изображения или его отдельных частей при повороте либо наклоне голограммы.

Управление характерной морфологией ЛИППС, отличающихся своим периодом, высотой и упорядоченностью, и имеющих заранее определённые спектральные и колориметрические характеристики, может позволить сформировать совокупность скрытых защитных признаков и задействовать следующий уровень контроля, используя инструментальные средства.

В настоящей статье предложен метод записи защитных голограмм на поверхности нержавеющей стали на основе ЛИППС с различной топологией за счёт динамического из-

менения поляризации при надлежащей траектории сканирования лазерного излучения наносекундной длительности. Анализ характерных визуальных признаков защитных голограмм позволяет осуществлять их идентификацию невооруженным глазом, без применения дополнительных технических средств.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Технология формирования защитных голограмм была протестирована на образцах стальных пластиин AISI 430 толщиной 0,5 мм с механически полированной поверхностью (уровень шероховатости $Ra \approx 0,05$ мкм). Лазерная обработка проводилась в условиях нормальной атмосферы. На рис. 1 показана схема экспериментальной установки. Генерация ЛИППС проводилась при помощи промышленной установки МиниМаркер-2 (ООО «Лазерный центр») на базе волоконного наносекундного лазера (IPG Photonics) с максимальной средней мощностью 20 Вт и длиной волны 1064 нм, частотой повторения импульсов от 20 до 99 кГц. Для контроля поляризации использовался поляризатор и полуволновая пластиинка. После этого лазерное излучение подавалось в гальванометрическую сканирующую систему, которая обеспечивала высокую скорость сканирования (до 8700 мм/с) по осям X/Y. Пучок фокусировался объективом плоского поля с фокусным расстоянием 216 мм. Диаметр сфокусированного пучка составлял 50 мкм на уровне $1/e^2$.

В зависимости от требуемой геометрии ЛИППС изменялось направление поляризации. Изменение поляризации лазерного излучения позволило создать области с различными направлениями ЛИППС, а также в случае поворота поляризации во время сканирования сформировать решётки с плавными поворотами структур.

В работе показана возможность управлять такими защитными эффектами в формируемом рисунке, как смена цвета изображения, эффект переключения изображения, изменение размера и формы элементов, анимация и динамика изображения. Доказано, что достичь этого возможно, комбинируя лишь параметры сканирования и поляризации излучения, не изменяя остальные характеристики лазерного воздействия.

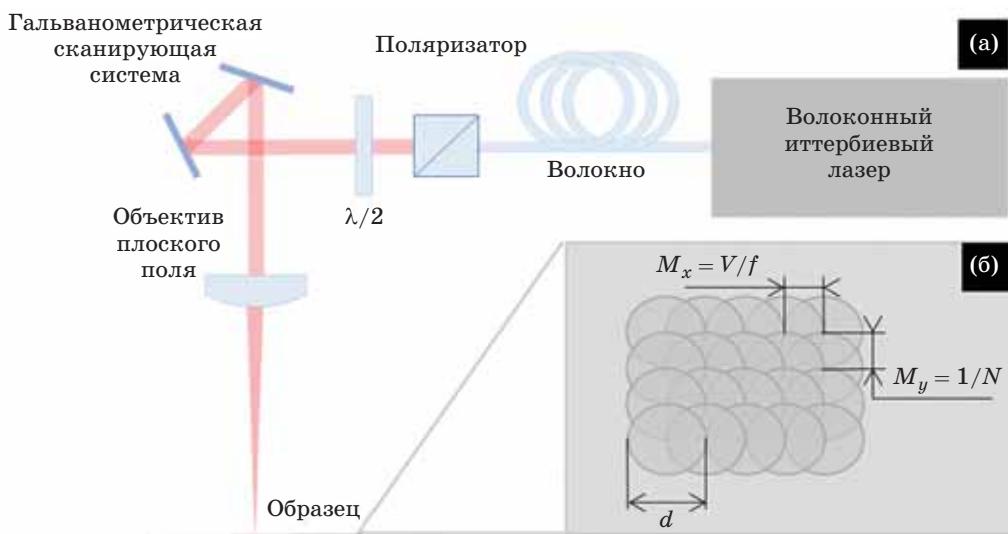


Рис. 1. Экспериментальная установка. (а) Структурная схема экспериментальной установки, (б) схема перекрытия лазерных импульсов

Fig. 1. Experimental setup. (a) Structure scheme of the experimental setup, (b) laser pulse overlap scheme

Для определения и измерения колориметрических характеристик поверхность образца освещалась светодиодом белого света диаметром 5 мм, который был единственным используемым источником освещения. Поворот образца на угол θ проводился при помощи круговой подвижки вокруг нормали к образцу. Фотографирование образца проводилось цифровой камерой Mars 1300-75GM/GC (Daheng New Epoch Technology).

Для характеристики топологии обработанной поверхности использовался оптический микроскоп (Carl Zeiss AxioImager A1) и атомно-силовой микроскоп (ACM, MT-MDT Nanoeducator). Периодичность ЛИППС оценивалась на основе двумерного быстрого преобразования Фурье (2D-БПФ), осуществлённого с применением свободно распространяемого ПО Gwyddion.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

В этом разделе представлены результаты записи защитных голограмм и записи визуальных признаков ЛИППС, а также показаны полученные микроструктуры с количественной оценкой качества.

1. Многоплановые по углу рассмотрения изображения, эффект смены нескольких наблюдаемых изображений

Защитная голограмма, записанная на поверхности стали AISI 430, показана на рис. 2б.

Для записи было использовано растровое изображение (рис. 2а). Режим лазерного воздействия: длительность импульса $\tau = 100$ нс, частота повторения импульсов $v = 35$ кГц, скорость сканирования $V = 55$ мм/с, шаг сканирования $M_x = 10$ мкм и плотность энергии в импульсе $E = 3,45$ Дж/см².

Эффект переключения цвета и изображения в голограмме достигается различными ориентациями ЛИППС. Основное изображение защитной голограммы состоит из наложенных 2D-изображений «Луна/Солнце». При наложении изображения разбиваются на квадратные пиксели размерами 100×100 мкм, которые показаны на рис. 2в. На выносках видно изменение ориентации ЛИППС, соответствующих пикселям различных изображений. Разница углов ориентаций ЛИППС двух различных пикселов составляет 90°. Таким образом, эффект смены основного изображения наблюдается при повороте угла освещения на 90°, если позиция наблюдения не изменяется. Кольцевой элемент защитной голограммы выполнен из сегментов (рис. 2(г–е)), в каждом сегменте ориентация ЛИППС изменялась на 15°. Таким образом, при повороте угла освещения цвет формируется на секторах, близких к перпендикуляру плоскости освещения, и переключается на соседние сектора при повороте угла освещения.

Поскольку ЛИППС выстраивались перпендикулярно вектору поляризации лазерного

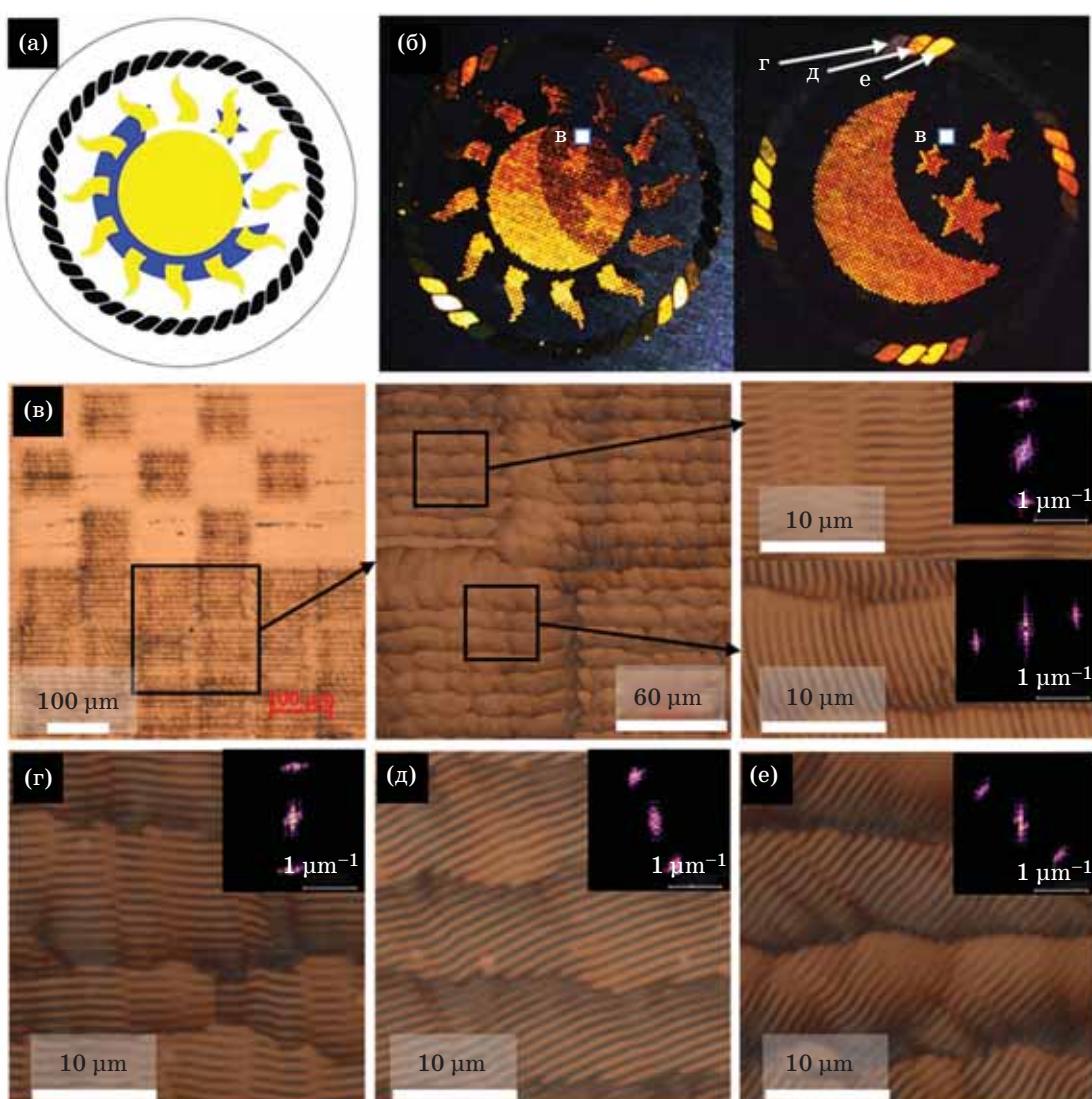


Рис. 2. Защитная голограмма, записанная на поверхности стали AISI 430. а) Исходное растровое изображение; б) записанная защитная голограмма (Режим лазерного воздействия: $\tau = 100$ нс, $v = 35$ кГц, $V = 55$ мм/с, $M_x = 10$ мкм, $E = 3,45$ Дж/см 2); в, г, д, е) микрофотографии разных сегментов, на вставках показаны Фурье-спектры соответствующих изображений

Fig. 2. Protection hologram recorded on the surface of AISI 430 steel: (a) original raster image; (b) recorded protection hologram (Laser impact mode: $\tau = 100$ ns, $v = 35$ kHz, $V = 55$ mm/s, $M_x = 10$ μm , $E = 3.45$ J/cm 2); (c, g, d, e) microphotographs of different segments, the insets show the Fourier spectrum of corresponding images

излучения, после каждого последовательного сканирования производился поворот поляризации, обеспечивая соответствующую пространственную ориентацию ЛИПСС в отсканированном сегменте. Измеренный период ЛИППС составлял $1,0 \pm 0,3$ мкм, качество оценивалось по параметру углового размытия ($\delta\theta$) аналогично [39] и составило $10,8 \pm 2,1^\circ$, что свидетельствует о высокой упорядоченности структур. Глубина рельефа была опреде-

лена с помощью атомно-силовой микроскопии (АСМ) и составила 20 ± 3 нм на всех секторах изображения. АСМ-изображение двух сегментов с ориентацией ЛИППС, перпендикулярной под углом 45° к треку сканирования, представлено на рис. 3.

Считаем важным осветить вопрос причин возникновения рельефа на поверхности металла в нашем исследовании. Рассматривая механизмы формирования ЛИППС, можно

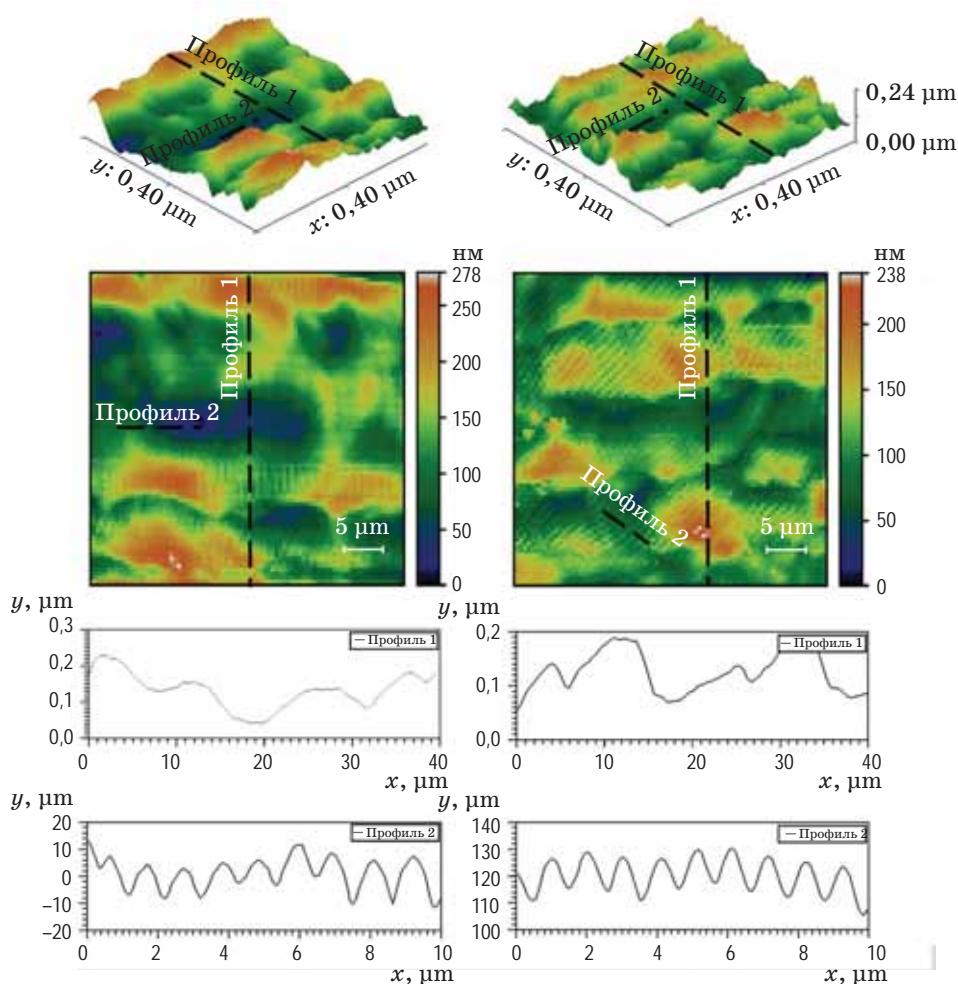


Рис. 3. АСМ-изображение поверхности защитной голограммы и профили поперечного сечения
Fig. 3. AFM image of the protective hologram surface and cross-section profiles

обратиться к работе [40], где проведена температурная оценка режимов для цветной лазерной маркировки. Температура поверхности тела в центре облучённой области определялась после обработки N -импульсами с равномерно распределённой интенсивностью без учёта изменения отражательной способности материала во время воздействия излучения. Полученные значения температур близки к температуре плавления стали (1510°C) и, если быть точным, находятся в диапазоне от 945°C до 1400°C , что значительно ниже температуры испарения стали, приблизительно равной 3000°C . Но оценка затруднена сложностью действующих факторов, определения итогового температурного поля, от которого зависит вовлечённость механизмов, таких как поверхностное плавление, абляция и испарение, а также существующими обрат-

ными связями оптических характеристик при нагреве материала. При абляционном механизме формирования структуры представляют собой набор канавок на поверхности материала, в случае субабляционного режима – массив выступов над поверхностью, состоящей из оксида [41]. Отличительной чертой этого типа структур является незначительное изменение рельефа, чьё отношение высоты структур к периоду составляет порядка 10^{-3} – 10^{-2} .

Также на изменение рельефа влияют гидродинамические процессы в расплавленном материале. В приповерхностном слое, пребывающем в жидкой фазе, развиваются нестабильности, обусловленные действием градиента сил поверхностного натяжения, вызванного разницей температуры расплава, и вследствие эффекта Марангони происходит перераспределение вещества [42,43].

Также при локальном испарении и аблации на формирование структур может влиять неравномерное ускорение различных областей расплава, нестабильность Релея–Тейлора [44]. В данном случае ЛИППС будет иметь вид «гребня» волны.

Поскольку на результатах сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ) и сканирующий электронный микроскопии (СЭМ) не обнаружено косвенных признаков прохождения аблации, мы можем предположить, что образование ЛИППС связано с окислением и перераспределением материала в жидкой фазе.

Таким образом, ЛИППС, работая как дифракционная решётка, может формировать структурный цвет, зависящий от пространственной ориентации, а также углов освещения и наблюдения, что схематично показано на рис. 4а. Функциональная зависимость длины волн дифрагированного света λ может быть вычислена с помощью уравнения дифракции [31]:

$$m\lambda = \Lambda(\sin\alpha\sin\theta + \sin\beta),$$

где m — порядок дифракции (поскольку в структурный цвет основной вклад вносит первый порядок дифракции $m = 1$, прочи-

ми порядками можно пренебречь), λ — длина волны структурного цвета 380–750 нм, охватывающая видимый диапазон, Λ — период ЛИППС, α — угол падения, θ — ориентация ЛИППС в направлении сканирования, β — угол отражения (наблюдения).

Для определения положения порядков дифракции и угловой чувствительности в зависимости от положения структур была построена карта цветопередачи для области 5×5 мм сформированными ЛИППС, показанная на рис. 4в. Образец освещался по кругу при зенитных углах падения света от 10 до 70° и угле наблюдения $\beta = 0^\circ$ в соответствии со схемой, представленной на рис. 4б. Поскольку за нулевое положение образца принято положение плоскости освещения, соправленное с направлением ЛИППС, азимутальный угол освещения и угол ориентации ЛИППС равны. На диаграмме цвета видно, что основной вклад в цвет вносит первый порядок дифракции, наблюдавшийся при углах освещения α от 45° до 75°. Максимальная интенсивность цвета достигается при перпендикулярном падении света к ориентации решётки, то есть при θ , равном 90° и 270°, и полностью спадает при повороте угла на $\Delta\theta = 45^\circ$ от этого положения.

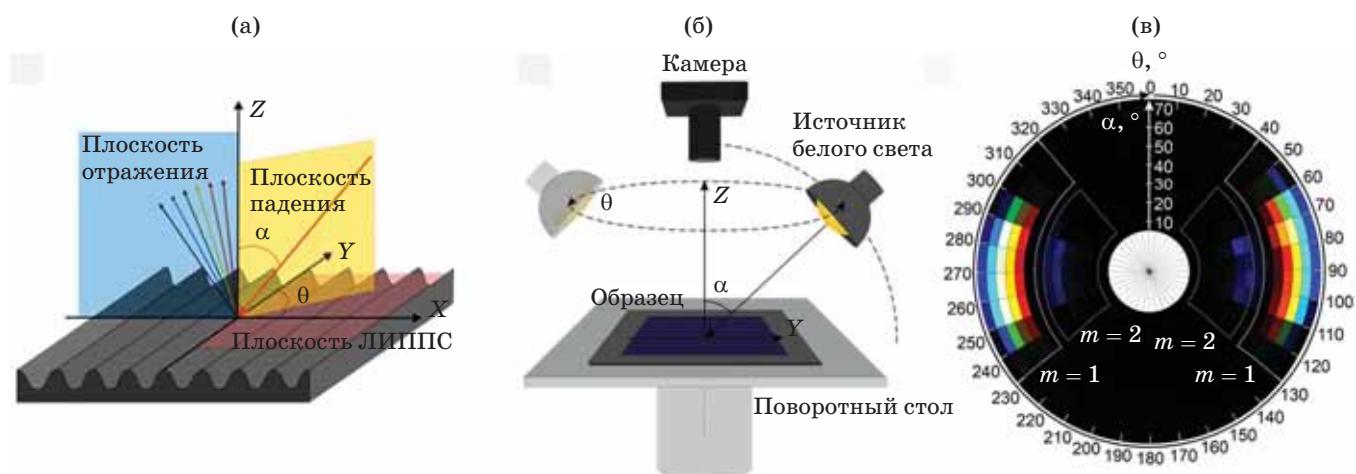


Рис. 4. Цветопередача элемента ЛИППС в зависимости от углов. а) Взаимодействие белого света с ЛИППС; б) схема фиксации колориметрических характеристик; в) цвет образца нержавеющей стали с ЛИППС при угле падения белого света α от 10 до 70°; угол ориентации ЛИППС в направлении сканирования θ от 0 до 360° при угле наблюдения $\beta = 0^\circ$

Fig. 4. Color rendering of the LIPSS element as a function of angles. (a) Interaction of white light with LIPSS; б) scheme of colorimetric characteristics fixation; в) color of a stainless steel sample with LIPSS at the angle of incidence of white light α from 10 to 70°; angle of LIPSS orientation in the scanning direction θ from 0 to 360° at the angle of observation $\beta = 0^\circ$

2. Эффекты динамики отдельных частей изображений, визуальное перемещение изображения, кинеграммы

Следующим реализованным признаком защитной голограммы стал эффект динамики изображения. Первый показанный эффект динамики заключается в анимации изображения и строится на принципе, предложенным фотографом Эдвардом Мейбриджем, который в 1878 году реализовал прибор зоопрактископ для демонстрации записанных им фаз движения животных [45].

Принцип работы эффекта динамики на примере записанной защитной голограммы показан на рис. 5: необходимо разбить изображения на фазы движения и реализовать механизм их переключения. В записанной защитной голограмме было реализовано движение двухмерного изображения лошади, состоящего из трёх фаз движения. Шаблон записи

представлен на рис. 5а. Микрофотография сегмента защитной голограммы показана на рис. 5г. Ширина треков сканирования составляла 30 мкм. Каждой фазе изображения соответствуют направления ЛИППС 90, 130, 230 градусов относительно трека сканирования, так чтобы не было видно одновременно двух фаз движения в соответствии с диаграммой рис. 4в. При любом угле освещения защитной голограммы работает только одно направление ЛИППС, при изменении направления освещения изменяется работающее направление ЛИППС, что схематично показано на рис. 5б. На рис. 5в показаны фотографии при угле наблюдения $\alpha = 50^\circ$ и трёх различных азимутальных углах с разницей в 45° . Видно, что наблюдается двумерное изображение, соответствующее фазам движения. При визуальном рассмотрении данного изображения во время изменения угла освещения или поворота образца

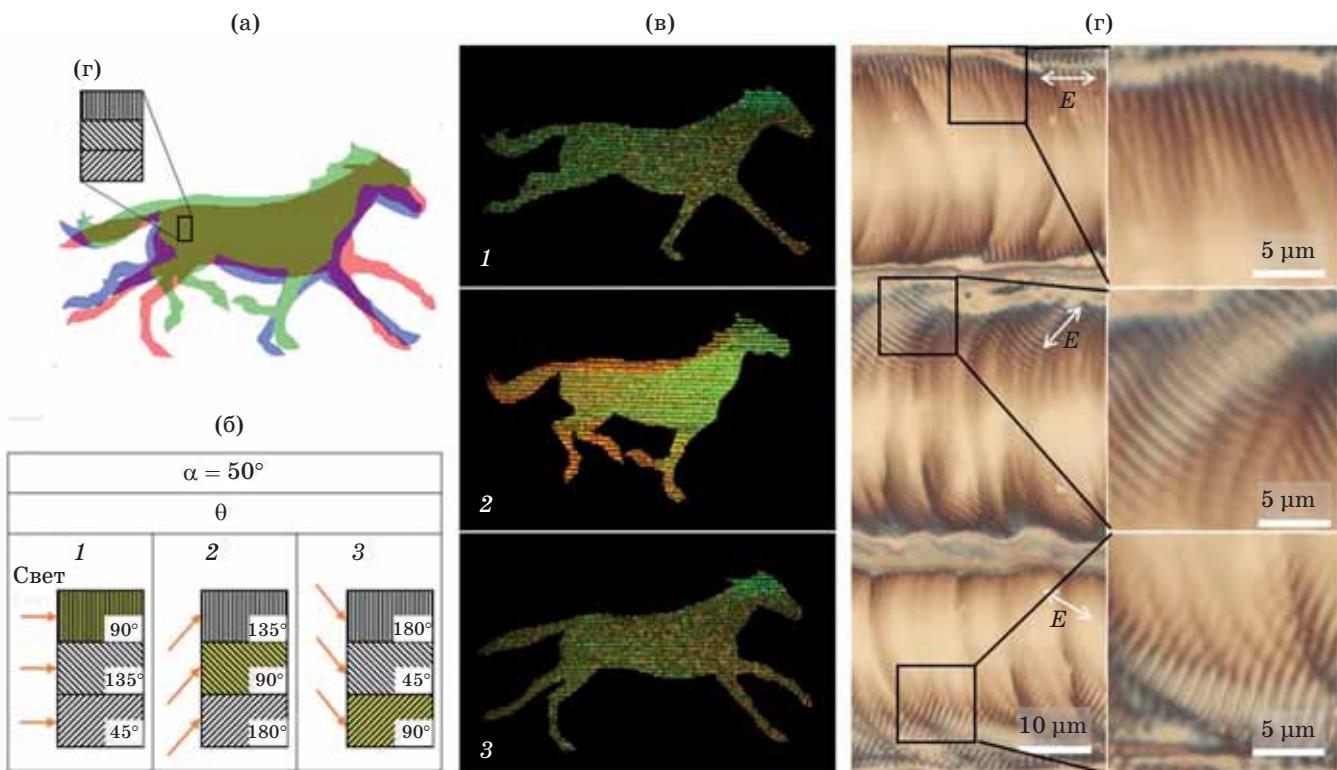


Рис. 5. Кинеграмма на основе ЛИППС. а) Растворный шаблон записи; б) схема активации фаз движения; в) фотографии при угле наблюдения $\alpha = 50$ градусов и трёх различных азимутальных углах с разницей в 45 градусов; г) микрофотографии сегмента кинеграммы (режим лазерного воздействия: $\tau = 100$ нс, $v = 35$ кГц, $V = 55$ мм/с, $M_x = 10$ мкм, $E = 3,45$ Дж/см 2)

Fig. 5. Kinegram based on LIPSS: (a) raster recording template; (b) scheme of motion phase activation; (c) photographs at observation angle $\alpha = 50$ degrees and three different azimuthal angles with a difference of 45 degrees; (d) microphotographs of the kinegram segment (laser impact mode: $\tau = 100$ ns, $v = 35$ kHz, $V = 55$ mm/s, $M_x = 10$ μ m, $E = 3,45$ J/cm 2)

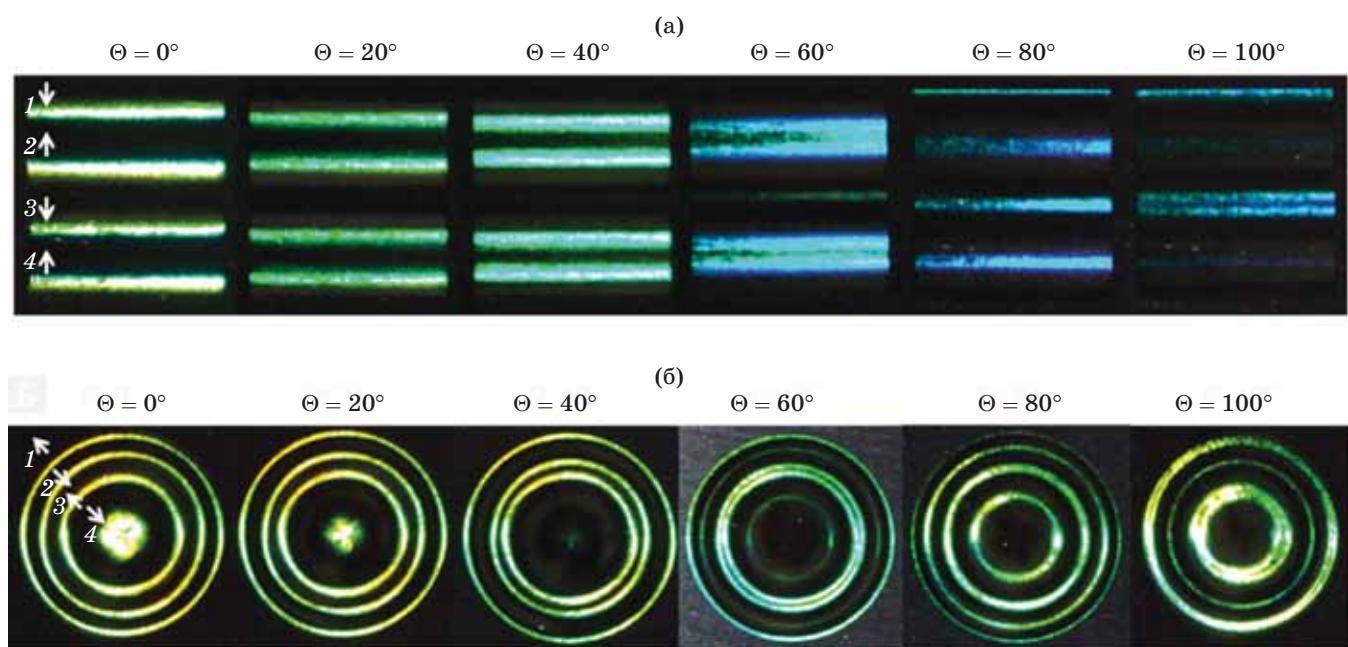


Рис. 6. Эффект движения. Влияние азимутального угла освещения θ на дифрагированный белый свет при построчном сканировании (а) и радиальном сканировании (б). Режим лазерного воздействия: $\tau = 100$ нс, $v = 35$ кГц, $V = 55$ мм/с, $M_x = 10$ мкм, $E = 3,45$ Дж/см 2 и для (а) $\omega = 30$ град/с для (б) $5\omega =$ град/с

Fig. 6. The effect of motion. Influence of the azimuthal angle of illumination θ on the diffracted white light during line scanning (a) and radial scanning (b). Laser impact mode: $\tau = 100$ ns, $v = 35$ kHz, $V = 55$ mm/s, $M_x = 10$ μ m, $E = 3,45$ J/cm 2 and for (a) $\omega = 30$ deg/s for (b) $5\omega =$ deg/s

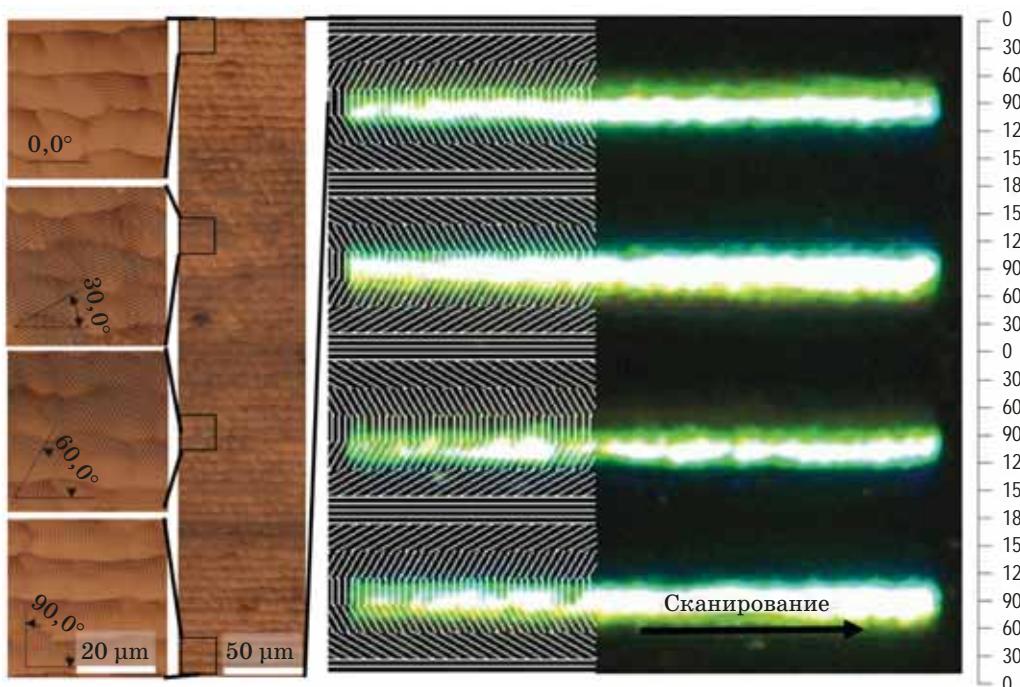


Рис. 7. Конфигурация пространственных ориентаций ЛИППС. Режим лазерного воздействия: $\tau = 100$ нс, $v = 35$ кГц, $V = 55$ мм/с, $M_x = 10$ мкм, $E = 3,45$ Дж/см 2 , $\omega = 30$ град/с

Fig. 7. Configuration of spatial orientations of LIPSS. Laser exposure mode: $\tau = 100$ ns, $v = 35$ kHz, $V = 55$ mm/s, $M_x = 10$ μ m, $E = 3.45$ J/cm 2 , $\omega = 30$ deg/s

наблюдается замещение одного изображения другим, что приводит к эффекту анимации.

Следующий эффект динамики заключался в визуальном плавном перемещении цвета в изображении. На рис. 6а, бб показано перемещение цвета при изменении угла освещения, фотографии сделаны при угле наблюдения 50° , с шагом изменения азимутального угла 20° . На образцах наблюдаются различные цветовые отклики в зависимости от траектории сканирования лазерного излучения.

Конфигурация ориентаций ЛИППС по сформированному образцу схематично показана на рис. 7, на выносках представлены микрофотографии ЛИППС. В записанных образцах ЛИППС изменяли направление от 0 до 180° , а затем от 180° до 0 градусов, за счёт этого изменялось направление цветового отклика по изображению. Причём заметно, что площадь формируемых ЛИППС зависит от направления поляризации относительно трека сканирования. Связанность формирования структур с различным направлением поляризации при сканировании описана в работе [46]. Вероятно, данный эффект связан с рассеиванием ПЭВ, зависящим от направления поляризации, а также от наличия и ориентации рельефа поверхности, напоминающего предварительно структурированную решётку [47].

На рис. 6а, бб видно, что при изменении азимутального угла освещения полосы № 1 и № 3 перемещаются вниз, полосы № 2 и № 4 вверх (или в случае сканирования по спирали № 1 и № 3 от центра, № 2 и № 4 к центру окружности).

Таким образом, изменяя скорость и направление вращения поляризации, а также конфигурацию сканирования лазерным излучением, можно добиться перемещения цвета по образцу с различным визуальным цветовым откликом при изменении освещения образца.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложен новый метод записи защитных голограмм на поверхности нержаве-

ющей стали, реализующий основные защитные признаки (изменение размера и формы элемента защитного знака, его цвета, анимация изображения и изменение его цвета при изменении угла наблюдения знака и т.д.) только комбинацией скорости сканирования пучка света по образцу и направления его поляризации при прямом лазерном воздействии на основе ЛИППС. Предложенный метод позволил сформировать элементарные дифракционные микрорешётки с периодом, равным длине волны действующего излучения, на площади всего лазерного отпечатка в фокусе оптической системы. Изменение ориентации ЛИППС во время воздействия позволило реализовывать характерные визуальные признаки, необходимые для создания защитных голограмм. В частности, продемонстрирована запись многоцветных изображений с элементами, плавно изменяющими цветовую гамму, свитч-эффектами переключения изображений, а также кинограмм с плавным движением отдельных элементов при повороте вокруг разных осей. В качестве второго уровня защиты, допускающего инструментальный контроль, в дальнейшем могут выступать морфология ЛИППС (период, глубина, упорядоченность), спектральные и колориметрические характеристики, а также скрытые микроизображения.

Кроме того, стоит отметить, что применение наносекундных лазерных источников и гальванометрических сканирующих систем уменьшает капиталовложения и затраты на техническое обслуживание. Применение ЛИППС с плавным изменением направления не ограничивается отражательными дифракционными решётками. Потенциально такие регулярные решётки могут использоваться в микрофлюидных приложениях для разделения потоков жидкости, в трибологических приложениях — для уменьшения коэффициента трения и отвода смазочных материалов, а также в биомедицинских приложениях для управления направлениями миграции клеток.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Денисюк Ю.Н. Мой путь в голограмии / Ю.Н. Денисюк — основоположник отечественной голограмии // Сборник трудов Всерос-

REFERENCES

- Denisyuk Yu.N. My way in holography / Yu.N. Denisyuk — the founder of Russian holography // Proceedings of the All-Russian Seminar. St. Pe-

- сийского семинара. СПб: СПбГУ ИТМО, 2007. С. 7–14.
2. Gabor D. Holography, 1948–1971 // Science. 1972. V. 177. № 4046. P. 299–313. <https://doi.org/10.1126/science.177.4046.299>
 3. Leith E.N., Upatnieks J. Reconstructed wave-fronts and communication theory // JOSA. 1962. V. 52. № 10. P. 1123–1130. <https://doi.org/10.1364/JOSA.52.001123>
 4. Benton S.A., Bove Jr.V.M. Holographic imaging. Hoboken.: John Wiley & Sons, 2008. 173 p. <https://doi.org/10.1002/9780470224137>
 5. Lu Y.T., Chi S. Compact, reliable asymmetric optical configuration for cost-effective fabrication of multiplex dot matrix hologram in anti-counterfeiting applications // Optik. 2003. V. 114. № 4. P. 161–167. <https://doi.org/10.1078/0030-4026-00241>
 6. Bulanovs A., Gerbreders V., Paschkevich V., Teteris J. Dot-matrix holographic recording in amorphous chalcogenide films // Advanced Optical Materials, Technologies, and Devices. SPIE. 2007. V. 6596. P. 128–131. <https://doi.org/10.1117/12.726405>
 7. Firsov A., Firsov A., Loechel B., Erko A., Svintsov A., Zaitsev S. Fabrication of digital rainbow holograms and 3D imaging using SEM based e-beam lithography // Optics Express. 2014. V. 22. № 23. P. 28756–28770. <https://doi.org/10.1364/OE.22.028756>
 8. Zhu X., Yan W., Levy U., Mortensen N.A., Kristensen A. Resonant laser printing of structural colors on high-index dielectric metasurfaces // Science advances. 2017. V. 3. № 5. P. e1602487. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1602487>
 9. Włodarczyk K.L., Ardon M., Waddie, A.J., Dunn A., Kidd M.D., Weston N.J., Hand D.P. Laser microsculpting for the generation of robust diffractive security markings on the surface of metals // Journal of Materials Processing Technology. 2015. V. 222. P. 206–218. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.03.001>
 10. Tamulevičius T., Juodėnas M., Klinavičius T., Paulauskas A., Jankauskas K., Ostreika A., Žutautas A., Tamulevičiu, S. Dot-matrix hologram rendering algorithm and its validation through direct laser interference patterning // Scientific reports. 2018. V. 8. № 1. P. 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-32294-5>
 11. Lasagni A.F., Gachot C., Trinh K.E., Hans M., Rosenkranz A., Roch T., Mücklich F. Direct laser interference patterning, 20 years of development: From the basics to industrial applications // Laser-based micro-and nanoprocessing XI. SPIE. 2017. V. 10092. № 3. P. 186–196. <https://doi.org/10.1117/12.2252595>
 12. Voisiat B., Wang W., Holzhey M., Lasagni A.F. Improving the homogeneity of diffraction based tersburg: St. Petersburg State University ITMO, 2007. P. 7–14.
 2. Gabor D. Holography, 1948–1971 // Science. 1972. V. 177. № 4046. P. 299–313. <https://doi.org/10.1126/science.177.4046.299>
 3. Leith E.N., Upatnieks J. Reconstructed wave-fronts and communication theory // JOSA. 1962. V. 52. № 10. P. 1123–1130. <https://doi.org/10.1364/JOSA.52.001123>
 4. Benton S.A., Bove Jr.V.M. Holographic imaging. Hoboken.: John Wiley & Sons, 2008. P. 173 <https://doi.org/10.1002/9780470224137>
 5. Lu Y.T., Chi S. Compact, reliable asymmetric optical configuration for cost-effective fabrication of multiplex dot matrix hologram in anti-counterfeiting applications // Optik. 2003. V. 114. № 4. P. 161–167. <https://doi.org/10.1078/0030-4026-00241>
 6. Bulanovs A., Gerbreders V., Paschkevich V., Teteris J. Dot-matrix holographic recording in amorphous chalcogenide films // Advanced Optical Materials, Technologies, and Devices. SPIE. 2007. V. 6596. P. 128–131. <https://doi.org/10.1117/12.726405>
 7. Firsov A., Firsov A., Loechel B., Erko A., Svintsov A., Zaitsev S. Fabrication of digital rainbow holograms and 3D imaging using SEM based e-beam lithography // Optics Express. 2014. V. 22. № 23. P. 28756–28770. <https://doi.org/10.1364/OE.22.028756>
 8. Zhu X., Yan W., Levy U., Mortensen N.A., Kristensen A. Resonant laser printing of structural colors on high-index dielectric metasurfaces // Science advances. 2017. V. 3. № 5. P. e1602487. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1602487>
 9. Włodarczyk K.L., Ardon M., Waddie, A.J., Dunn A., Kidd M.D., Weston N.J., Hand D.P. Laser microsculpting for the generation of robust diffractive security markings on the surface of metals // Journal of Materials Processing Technology. 2015. V. 222. P. 206–218. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.03.001>
 10. Tamulevičius T., Juodėnas M., Klinavičius T., Paulauskas A., Jankauskas K., Ostreika A., Žutautas A., Tamulevičiu, S. Dot-matrix hologram rendering algorithm and its validation through direct laser interference patterning // Scientific reports. 2018. V. 8. № 1. P. 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-32294-5>
 11. Lasagni A.F., Gachot C., Trinh K.E., Hans M., Rosenkranz A., Roch T., Mücklich F. Direct laser interference patterning, 20 years of development: From the basics to industrial applications // Laser-based micro-and nanoprocessing XI. SPIE. 2017. V. 10092. № 3. P. 186–196. <https://doi.org/10.1117/12.2252595>
 12. Voisiat B., Wang W., Holzhey M., Lasagni A.F. Improving the homogeneity of diffraction based

- colours by fabricating periodic patterns with gradient spatial period using Direct Laser Interference Patterning // *Scientific reports*. 2019. V. 9. № 1. P. 1–9. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-44212-4>
13. Birnbaum M. Semiconductor surface damage produced by ruby lasers // *Journal of Applied Physics*. 1965. V. 36. № 11. P. 3688–3689. <https://doi.org/10.1063/1.1703071>
14. Akhmanov S.A., Emel'yanov V.I., Koroteev N.I., Seminogov V.N. Interaction of powerful laser radiation with the surfaces of semiconductors and metals: nonlinear optical effects and nonlinear optical diagnostics // *Soviet Physics Uspekhi*. 1985. V. 28. № 12. P. 1084. <https://doi.org/10.1070/PU1985v028n12ABEH003986>
15. Rudenko A., Mauclair C., Garrelie F., Stoian R., Colombier, J.P. Amplification and regulation of periodic nanostructures in multipulse ultra-short laser-induced surface evolution by electromagnetic-hydrodynamic simulations // *Physical Review B*. 2019. V. 99. № 23. P. 235412. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.99.235412>
16. Reif J., Varlamova O., Varlamov S., Beste-horn M. The role of asymmetric excitation in self-organized nanostructure formation upon femtosecond laser ablation // *AIP Conference Proceedings*. American Institute of Physics. 2012. V. 1464. № 1. P. 428–441. <https://doi.org/10.1063/1.4739897>
17. Bonse J., Gräf S. Maxwell meets Marangoni — a review of theories on laser-induced periodic surface structures // *Laser & Photonics Reviews*. 2020. V. 14. № 10. P. 2000215. <https://doi.org/10.1002/lpor.202000215>
18. Dusser B., Sagan Z., Soder H., Faure N., Colombier J.P., Jourlin M., Audouard E. Controlled nanostructures formation by ultrafast laser pulses for color marking // *Optics express*. 2010. V. 18. № 3. P. 2913–2924. <https://doi.org/10.1007/s00339-012-6849-y>
19. Ionin A.A., Kudryashov S.I., Makarov S.V., Seleznev L.V., Sinitsyn D.V., Golosov E.V., Golosova O.A., Kolobov Y.R., Ligachev A.E. Femtosecond laser color marking of metal and semiconductor surfaces // *Applied Physics A*. 2012. V. 107. № 2. P. 301–305. <https://doi.org/10.1007/s00339-012-6849-y>
20. Tan B., Venkatakrishnan K. A femtosecond laser-induced periodical surface structure on crystalline silicon // *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 2006. V. 16. № 5. P. 1080. <https://doi.org/10.1088/0960-1317/16/5/029>
21. Vorobyev A.Y., Guo C. Effects of nanostructure-covered femtosecond laser-induced periodic surface structures on optical absorptance of metals // *Applied Physics A*. 2007. V. 86. № 3. P. 321–324. <https://doi.org/10.1007/s00339-006-3800-0>
- colours by fabricating periodic patterns with gradient spatial period using Direct Laser Interference Patterning // *Scientific reports*. 2019. V. 9. № 1. P. 1–9. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-44212-4>
13. Birnbaum M. Semiconductor surface damage produced by ruby lasers // *Journal of Applied Physics*. 1965. V. 36. № 11. P. 3688–3689. <https://doi.org/10.1063/1.1703071>
14. Akhmanov S.A., Emel'yanov V.I., Koroteev N.I., Seminogov V.N. Interaction of powerful laser radiation with the surfaces of semiconductors and metals: nonlinear optical effects and nonlinear optical diagnostics // *Soviet Physics Uspekhi*. 1985. V. 28. № 12. P. 1084. <https://doi.org/10.1070/PU1985v028n12ABEH003986>
15. Rudenko A., Mauclair C., Garrelie F., Stoian R., Colombier, J.P. Amplification and regulation of periodic nanostructures in multipulse ultra-short laser-induced surface evolution by electromagnetic-hydrodynamic simulations // *Physical Review B*. 2019. V. 99. № 23. P. 235412. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.99.235412>
16. Reif J., Varlamova O., Varlamov S., Beste-horn M. The role of asymmetric excitation in self-organized nanostructure formation upon femtosecond laser ablation // *AIP Conference Proceedings*. American Institute of Physics. 2012. V. 1464. № 1. P. 428–441. <https://doi.org/10.1063/1.4739897>
17. Bonse J., Gräf S. Maxwell meets Marangoni — a review of theories on laser-induced periodic surface structures // *Laser & Photonics Reviews*. 2020. V. 14. № 10. P. 2000215. <https://doi.org/10.1002/lpor.202000215>
18. Dusser B., Sagan Z., Soder H., Faure N., Colombier J.P., Jourlin M., Audouard E. Controlled nanostructures formation by ultrafast laser pulses for color marking // *Optics express*. 2010. V. 18. № 3. P. 2913–2924. <https://doi.org/10.1007/s00339-012-6849-y>
19. Ionin A.A., Kudryashov S.I., Makarov S.V., Seleznev L.V., Sinitsyn D.V., Golosov E.V., Golosova O.A., Kolobov Y.R., Ligachev A.E. Femtosecond laser color marking of metal and semiconductor surfaces // *Applied Physics A*. 2012. V. 107. № 2. P. 301–305. <https://doi.org/10.1007/s00339-012-6849-y>
20. Tan B., Venkatakrishnan K. A femtosecond laser-induced periodical surface structure on crystalline silicon // *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 2006. V. 16. № 5. P. 1080. <https://doi.org/10.1088/0960-1317/16/5/029>
21. Vorobyev A.Y., Guo C. Effects of nanostructure-covered femtosecond laser-induced periodic surface structures on optical absorptance of metals // *Applied Physics A*. 2007. V. 86. № 3. P. 321–324. <https://doi.org/10.1007/s00339-006-3800-0>

22. Bonse J., Krüger J., Höhm S., Rosenfeld A. Femtosecond laser-induced periodic surface structures // Journal of Laser Applications. 2012. V. 24. № 4. P. 042006. <https://doi.org/10.2351/1.4712658>
23. Gräf S., Kunz C., Müller F.A. Formation and properties of laser-induced periodic surface structures on different glasses // Materials. 2017. V. 10. № 8. V. 933. <https://doi.org/10.3390/ma10080933>
24. Rebollar E., Castillejo M., Ezquerro T.A. Laser induced periodic surface structures on polymer films: From fundamentals to applications // European Polymer Journal. 2015. V. 73. P. 162–174. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2015.10.012>
25. Long J., Fan P., Zhong M., Zhang H., Xie Y., Lin C. Superhydrophobic and colorful copper surfaces fabricated by picosecond laser induced periodic nanostructures // Applied Surface Science. 2014. V. 311. P. 461–467. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.05.090>
26. Zhang Y., Zou G., Liu L., Wu A., Sun Z., Zhou Y.N. Vacuum brazing of alumina to stainless steel using femtosecond laser patterned periodic surface structure // Materials Science and Engineering: A. 2016. V. 662. P. 178–184. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.03.068>
27. Vorobyev A.Y., Guo C. Colorizing metals with femtosecond laser pulses // Applied Physics Letters. 2008. V. 92. № 4. P. 041914. <https://doi.org/10.1063/1.2834902>
28. Bonse J., Höhm S., Koter R., Hartelt M., Spaltmann D., Pentzien S., Rosenfeld A., Krüger J. Tribological performance of sub-100-nm femtosecond laser-induced periodic surface structures on titanium // Applied Surface Science. 2016. V. 374. P. 190–196. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.11.019>
29. Martínez-Calderon M., Manso-Silván M., Rodríguez A., Gómez-Aranzadi M., García-Ruiz J.P., Olaizola S.M., Martín-Palma R.J. Surface micro- and nano-texturing of stainless steel by femtosecond laser for the control of cell migration // Scientific reports. 2016. V. 6. №. 1. P. 1–10. <https://doi.org/10.1038/srep36296>
30. Ackerl N., Gugger P., Wegener K. Laser marking and coloration of Ti-6Al-4V with ultrashort pulses // Journal of Laser Applications. 2020. V. 32. № 3. P. 032013. <https://doi.org/10.2351/7.0000021>
31. Li G., Li J., Hu Y., Zhang C., Li X., Chu J., Huang W. Femtosecond laser color marking stainless steel surface with different wavelengths // Applied Physics A. 2015. V. 118. № 4. P. 1189–1196. <https://doi.org/10.1007/s00339-014-8868-3>
32. Lee K., Ki H. Femtosecond laser patterning based on the control of surface reflectance // Applied Surface Science. 2019. V. 494. P. 187–195. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.07.163>
33. Jwad T., Penchev P., Nasrollahi V., Dimov S. Laser induced ripples' gratings with angular
22. Bonse J., Krüger J., Höhm S., Rosenfeld A. Femtosecond laser-induced periodic surface structures // Journal of Laser Applications. 2012. V. 24. № 4. P. 042006. <https://doi.org/10.2351/1.4712658>
23. Gräf S., Kunz C., Müller F.A. Formation and properties of laser-induced periodic surface structures on different glasses // Materials. 2017. V. 10. № 8. V. 933. <https://doi.org/10.3390/ma10080933>
24. Rebollar E., Castillejo M., Ezquerro T.A. Laser induced periodic surface structures on polymer films: From fundamentals to applications // European Polymer Journal. 2015. V. 73. P. 162–174. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2015.10.012>
25. Long J., Fan P., Zhong M., Zhang H., Xie Y., Lin C. Superhydrophobic and colorful copper surfaces fabricated by picosecond laser induced periodic nanostructures // Applied Surface Science. 2014. V. 311. P. 461–467. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.05.090>
26. Zhang Y., Zou G., Liu L., Wu A., Sun Z., Zhou Y.N. Vacuum brazing of alumina to stainless steel using femtosecond laser patterned periodic surface structure // Materials Science and Engineering: A. 2016. V. 662. P. 178–184. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.03.068>
27. Vorobyev A.Y., Guo C. Colorizing metals with femtosecond laser pulses // Applied Physics Letters. 2008. V. 92. № 4. P. 041914. <https://doi.org/10.1063/1.2834902>
28. Bonse J., Höhm S., Koter R., Hartelt M., Spaltmann D., Pentzien S., Rosenfeld A., Krüger J. Tribological performance of sub-100-nm femtosecond laser-induced periodic surface structures on titanium // Applied Surface Science. 2016. V. 374. P. 190–196. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.11.019>
29. Martínez-Calderon M., Manso-Silván M., Rodríguez A., Gómez-Aranzadi M., García-Ruiz J.P., Olaizola S.M., Martín-Palma R.J. Surface micro- and nano-texturing of stainless steel by femtosecond laser for the control of cell migration // Scientific reports. 2016. V. 6. №. 1. P. 1–10. <https://doi.org/10.1038/srep36296>
30. Ackerl N., Gugger P., Wegener K. Laser marking and coloration of Ti-6Al-4V with ultrashort pulses // Journal of Laser Applications. 2020. V. 32. № 3. P. 032013. <https://doi.org/10.2351/7.0000021>
31. Li G., Li J., Hu Y., Zhang C., Li X., Chu J., Huang W. Femtosecond laser color marking stainless steel surface with different wavelengths // Applied Physics A. 2015. V. 118. № 4. P. 1189–1196. <https://doi.org/10.1007/s00339-014-8868-3>
32. Lee K., Ki H. Femtosecond laser patterning based on the control of surface reflectance // Applied Surface Science. 2019. V. 494. P. 187–195. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.07.163>
33. Jwad T., Penchev P., Nasrollahi V., Dimov S. Laser induced ripples' gratings with angular

- periodicity for fabrication of diffraction holograms // Applied Surface Science. 2018. V. 453. P. 449–456. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.04.277>
34. Gräf S. Formation of laser-induced periodic surface structures on different materials: fundamentals, properties and applications // Advanced Optical Technologies. 2020. V. 9. № 1–2. P. 11–39. <https://doi.org/10.1515/aot-2019-0062>
35. Liu W., Jiang L., Han W., Hu J., Li X., Huang J., Zhan S., Lu Y. Manipulation of LIPSS orientation on silicon surfaces using orthogonally polarized femtosecond laser double-pulse trains // Optics Express. 2019. V. 27. № 7. P. 9782–9793. <https://doi.org/10.1364/OE.27.009782>
36. Kotsiuba Y., Hevko I., Bellucci S., Gnilitskyi I. Bitmap and vectorial hologram recording by using femtosecond laser pulses // Scientific Reports. 2021. V. 11. № 1. P. 1–8. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-95665-5>
37. Hermens U., Pothen M., Winands K., Arntz K., Klocke F. Automated polarization control for the precise alignment of laser-induced self-organized nanostructures // Optics and Lasers in Engineering. 2018. V. 101. P. 44–50. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2017.10.001>
38. Одиноков С. Методы и оптико-электронные приборы для автоматического контроля подлинности защитных голограмм. М.: Техносфера, 2013. 176 с.
39. Gnilitskyi I., Derrien T.J.Y., Levy Y., Bulgakova N.M., Mocek T., Orazi L. High-speed manufacturing of highly regular femtosecond laser-induced periodic surface structures: Physical origin of regularity // Scientific reports. 2017. V. 7. № 1. P. 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-08788-z>
40. Andreeva Y.M., Luong V.C., Lutoshina D.S., Medvedev O.S., Mikhailovskii V.Y., Moskvin M.K., Odintsova G.V., Romanov V.V., Shchedrina N.N., Veiko V.P. Laser coloration of metals in visual art and design // Optical Materials Express. 2019. V. 9. № 3. P. 1310–1319. <https://doi.org/10.1364/OME.9.001310>
41. Öktem B., Pavlov I., Ilday S., Kalaycıoğlu H., Rybak A., Yavaş S., Erdogan M., Ilday F.Ö. Nonlinear laser lithography for indefinitely large-area nanostructuring with femtosecond pulses // Nat Photon. 2013. V. 7. № 11. P. 897–901. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2013.272>
42. Rudenko A., Abou-Saleh A., Pigeon F., Maclair C., Garrelie F., Stoian R., Colombier J.P. High-frequency periodic patterns driven by non-radiative fields coupled with Marangoni convection instabilities on laser-excited metal surfaces // Acta Materialia. 2020. V. 194. P. 93–105. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2020.04.058>
- periodicity for fabrication of diffraction holograms // Applied Surface Science. 2018. V. 453. P. 449–456. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.04.277>
34. Gräf S. Formation of laser-induced periodic surface structures on different materials: fundamentals, properties and applications // Advanced Optical Technologies. 2020. V. 9. № 1–2. P. 11–39. <https://doi.org/10.1515/aot-2019-0062>
35. Liu W., Jiang L., Han W., Hu J., Li X., Huang J., Zhan S., Lu Y. Manipulation of LIPSS orientation on silicon surfaces using orthogonally polarized femtosecond laser double-pulse trains // Optics Express. 2019. V. 27. № 7. P. 9782–9793. <https://doi.org/10.1364/OE.27.009782>
36. Kotsiuba Y., Hevko I., Bellucci S., Gnilitskyi I. Bitmap and vectorial hologram recording by using femtosecond laser pulses // Scientific Reports. 2021. V. 11. № 1. P. 1–8. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-95665-5>
37. Hermens U., Pothen M., Winands K., Arntz K., Klocke F. Automated polarization control for the precise alignment of laser-induced self-organized nanostructures // Optics and Lasers in Engineering. 2018. V. 101. P. 44–50. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2017.10.001>
38. Odinokov S. Methods and optoelectronic devices for automatic verification of the authenticity of protective holograms. Moscow: Technosphere, 2013. 176 p.
39. Gnilitskyi I., Derrien T.J.Y., Levy Y., Bulgakova N.M., Mocek T., Orazi L. High-speed manufacturing of highly regular femtosecond laser-induced periodic surface structures: Physical origin of regularity // Scientific reports. 2017. V. 7. № 1. P. 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-08788-z>
40. Andreeva Y.M., Luong V.C., Lutoshina D.S., Medvedev O.S., Mikhailovskii V.Y., Moskvin M.K., Odintsova G.V., Romanov V.V., Shchedrina N.N., Veiko V.P. Laser coloration of metals in visual art and design // Optical Materials Express. 2019. V. 9. № 3. P. 1310–1319. <https://doi.org/10.1364/OME.9.001310>
41. Öktem B., Pavlov I., Ilday S., Kalaycıoğlu H., Rybak A., Yavaş S., Erdogan M., Ilday F.Ö. Nonlinear laser lithography for indefinitely large-area nanostructuring with femtosecond pulses // Nat Photon. 2013. V. 7. № 11. P. 897–901. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2013.272>
42. Rudenko A., Abou-Saleh A., Pigeon F., Maclair C., Garrelie F., Stoian R., Colombier J.P. High-frequency periodic patterns driven by non-radiative fields coupled with Marangoni convection instabilities on laser-excited metal surfaces // Acta Materialia. 2020. V. 194. P. 93–105. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2020.04.058>

43. Tsibidis G.D., Skoulas E., Papadopoulos A., Stratakis E. Convection roll-driven generation of supra-wavelength periodic surface structures on dielectric suponir radiation with femtosecond pulsed lasers // Physical Review B. 2016. V. 94. № 8. P. 081305. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.94.081305>
44. Gurevich E.L. Mechanisms of femtosecond LIPSS formation induced by periodic surface temperature modulation // Applied Surface Science. 2016. V. 374. P. 56–60. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.09.091>
45. Prodger P., Gunning T. Time stands still: Muybridge and the instantaneous photography movement. Oxford.: Oxford University Press, 2003. 328 p.
46. Fauchet P.M., Siegman A.E. Surface ripples on silicon and gallium arsenide under picosecond laser illumination // Applied Physics Letters. 1982. V. 40. № 9. P. 824–826. <https://doi.org/10.1063/1.93274>
47. Zhang C.Y., Yao J.W., Liu H.Y., Dai Q.F., Wu L.J., Lan S., Trofimov V.A., Lysak T.M. Colorizing silicon surface with regular nanohole arrays induced by femtosecond laser pulses // Optics letters. 2012. V. 37. № 6. P. 1106–1108. <https://doi.org/10.1364/OL.37.001106>
43. Tsibidis G.D., Skoulas E., Papadopoulos A., Stratakis E. Convection roll-driven generation of supra-wavelength periodic surface structures on dielectric suponir radiation with femtosecond pulsed lasers // Physical Review B. 2016. V. 94. № 8. P. 081305. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.94.081305>
44. Gurevich E.L. Mechanisms of femtosecond LIPSS formation induced by periodic surface temperature modulation // Applied Surface Science. 2016. V. 374. P. 56–60. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.09.091>
45. Prodger P., Gunning T. Time stands still: Muybridge and the instantaneous photography movement. Oxford.: Oxford University Press, 2003. P. 328.
46. Fauchet P.M., Siegman A.E. Surface ripples on silicon and gallium arsenide under picosecond laser illumination // Applied Physics Letters. 1982. V. 40. № 9. P. 824–826. <https://doi.org/10.1063/1.93274>
47. Zhang C.Y., Yao J.W., Liu H.Y., Dai Q.F., Wu L.J., Lan S., Trofimov V.A., Lysak T.M. Colorizing silicon surface with regular nanohole arrays induced by femtosecond laser pulses // Optics letters. 2012. V. 37. № 6. P. 1106–1108. <https://doi.org/10.1364/OL.37.001106>

АВТОРЫ

Михаил Константинович Москвин — младший научный сотрудник, Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия; Scopus ID: 57194008858, <http://orcid.org/0000-0001-7399-7022>, mkmoskvin@itmo.ru

Надежда Николаевна Щедрина — инженер, Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия; <http://orcid.org/0000-0002-1517-1043>, schedrina.nadezda@itmo.ru

Артур Джуракулович Долгополов — инженер, Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия; <http://orcid.org/0000-0002-9548-791X>, addolgopolov@itmo.ru

Евгений Витальевич Прокофьев — инженер, Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия; <http://orcid.org/0000-0002-1048-6038>, zhenya.prokofev.1998@mail.ru

Валерий Витальевич Романов — инженер-исследователь, Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия; <http://orcid.org/000-0003-1468-9438>, vvromanov@itmo.ru

Дмитрий Андреевич Синев — канд. техн. наук, научный сотрудник, Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия; <http://orcid.org/0000-0002-6274-1491>, sinev@itmo.ru

Вадим Павлович Вейко — доктор техн. наук, профессор, главный научный сотрудник, Университет ИТМО,

AUTHORS

Mikhail K. Moskvin — Junior Researcher, ITMO University, 197101, Saint-Petersburg, Russia; Scopus ID: 57194008858, <http://orcid.org/0000-0001-7399-7022>, mkmoskvin@itmo.ru

Nadezhda N. Shchedrina — Engineer, ITMO University, 197101, Saint-Petersburg, Russia; <http://orcid.org/0000-0002-1517-1043>, schedrina.nadezda@itmo.ru

Arthur G. Dolgopolov — Engineer, ITMO University, 197101, Saint-Petersburg, Russia; <http://orcid.org/0000-0002-9548-791X>, addolgopolov@itmo.ru

Evgeniy V. Prokofiev — Engineer, ITMO University, 197101, Saint-Petersburg, Russia; <http://orcid.org/0000-0002-1048-6038>, zhenya.prokofev.1998@mail.ru

Valeriy V. Romanov — Research Engineer, ITMO University, 197101, Saint-Petersburg, Russia; <http://orcid.org/000-0003-1468-9438>, vvromanov@itmo.ru

Dmitriy A. Sinev — PhD, Researcher, ITMO University, 197101, Saint-Petersburg, Russia; <http://orcid.org/0000-0002-6274-1491>, sinev@itmo.ru

Vadim P. Veiko — Dr.Sc., Professor, Senior Researcher, ITMO University, 197101, Saint-Petersburg,

197101, Санкт-Петербург, Россия; <http://orcid.org/0000-0001-6071-3449>, vpveiko@itmo.ru

Галина Викторовна Одинцова — канд. техн. наук, главный научный сотрудник, Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия; Scopus ID: 37036063100, <http://orcid.org/0000-0001-9581-4290>, gvodintsova@itmo.ru

Статья поступила в редакцию 05.10.2022
Одобрена после рецензирования 28.12.2022
Принята к печати 27.02.2023

Russia; <http://orcid.org/0000-0001-6071-3449>, vpveiko@itmo.ru

Galina V. Odintsova — PhD, Senior Researcher, ITMO University, 197101, Saint-Petersburg, Russia; Scopus ID: 37036063100, <http://orcid.org/0000-0001-9581-4290>, gvodintsova@itmo.ru

*The article was submitted to the editorial office 05.10.2022
Approved after review 28.12.2022
Accepted for publication 27.02.2023*