

doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-1-23-32

УДК 535.211, 535.217, 544.032.65

Прямая лазерная термохимическая запись на пленках титана для создания растрированных изображений

Артем Дмитриевич Пивоваров¹, Екатерина Викторовна Усынина²,
Дмитрий Андреевич Синева³✉

^{1,2,3} Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

¹ yvwwwv@bk.ru, <https://orcid.org/0009-0006-7911-7085>

² kattyuus@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-3642-2913>

³ sinev@itmo.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-6274-1491>

Аннотация

Введение. Формирование полутоновых фотошаблонов является сложной технической задачей, которая в ряде случаев может быть решена за счет растривания. Существующие работы в области прямой лазерной термохимической записи показывают возможности формирования локальных областей прозрачности в результате окисления тонких пленок металлов, но итоговый контраст коэффициента пропускания получаемой структуры оказывается сложно прогнозируемым в связи с комплексностью влияющих факторов. В настоящей работе предлагается экспериментальный подход к объединению методов полутоновой термохимической записи и фоторастривания для создания структур с управляемой прозрачностью на пленках титана, которые могут составить основу для записи топологий растрированных фотошаблонов. **Метод.** В качестве образцов использованы тонкие (20–40 нм) пленки титана, воздействие на которые осуществлялось с помощью технологического комплекса «МиниМаркер-2» на базе волоконного иттербиевого лазера. Прямая запись сканирующим сфокусированным пучком выполнена с использованием встроенной системы гальванометрических сканаторов. Анализ оптических и геометрических характеристик записанных структур проведен с применением оптического микроскопа. Экспериментально определенные режимы записи подтверждены проведенным численно-аналитическим моделированием температурных режимов. **Основные результаты.** Показано, что формирование контрастных структур происходит в диапазонах плотностей мощности 15–140 МВт/м² при сканировании со скоростями от 0,1 до 1 мм/с, а изменение контрастности структур достигается при плотностях мощности 50–90 МВт/м². Контраст коэффициента пропускания записанных структур относительно исходного значения прозрачности пленки управляемо варьируется от 1 до 40 %. В ряде режимов выявлено формирование периодических структур с периодом порядка 0,71 мкм, приводящих к дифракционным эффектам, наблюдаемым в отраженном свете. **Обсуждение.** Получены теоретически смоделированные и экспериментально подтвержденные режимы записи структур при воздействии излучения наносекундной длительности. Показано, что варьирование параметров воздействия позволяет локализовать области окисления, что приводит к изменению контраста интенсивности проходящего света и позволяет создавать полутоновые растрированные изображения с заданными значениями градации серого в проходящем свете. Практическая значимость полученных результатов показана на примере записи оптического элемента типа полутонового растрированного фотошаблона с заданной геометрией и значениями контраста.

Ключевые слова

растрированные фотошаблоны, тонкие пленки титана, лазерная термохимическая запись, дифракционная оптика, лазерная литография, лазерно-индуцированное окисление, лазерно-индуцированные поверхностные периодические структуры

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-79-10230, <https://rscf.ru/project/24-79-10230/>.

Авторы благодарят аспиранта Института лазерных технологий Университета ИТМО Ибрахима Косая за помощь в проведении экспериментов.

Ссылка для цитирования: Пивоваров А.Д., Усынина Е.В., Синева Д.А. Прямая лазерная термохимическая запись на пленках титана для создания растрированных изображений // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2025. Т. 25, № 1. С. 23–32. doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-1-23-32

© Пивоваров А.Д., Усынина Е.В., Синева Д.А., 2025

Direct laser thermochemical writing on titanium films for rasterized images creation

Artem D. Pivovarov¹, Ekaterina V. Usynina², Dmitry A. Sinev³✉

^{1,2,3} ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

¹ vvvvvv@bk.ru, <https://orcid.org/0009-0006-7911-7085>

² kattyuus@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-3642-2913>

³ sinev@itmo.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-6274-1491>

Abstract

Creating greyscale photomasks is an uncommon technical problem which in some cases can be solved by rasterization. At the same time, existing works on the direct laser thermochemical recording show the possibility of forming local areas of transparency as a result of oxidation of thin metal films, but the final contrast of the transmittance coefficient of the resulting structure turns out to be difficult to predict due to the complexity of the web of influencing factors. In the present work, we propose an experimental approach to combining the methods of greyscale thermochemical recording and rasterizing by creating structures with controlled transparency on titanium films which can form the basis for recording topologies of rasterized photomasks. The samples used in this study were thin (20–40 nm) titanium films which were treated using the Minimarker-2 technological complex based on a fiber ytterbium laser. Direct recording with a scanning focused beam was performed using a built-in system of galvanometric scanners. The optical and geometric characteristics of the recorded structures were analyzed using an optical microscope. The experimentally determined recording modes were confirmed by semi-analytical temperature modeling. It is shown that the formation of contrast structures occurs in the ranges of power densities about 15–140 MW/m² when scanning at speeds from 0.1 to 1 mm/s, and the change in the contrast of the structures is achieved at power densities of about 50–90 MW/m². The contrast of the transmission coefficient of the recorded structures relative to the initial value of the film transparency is controlled to vary from 1 to 40 %. In a number of regimes, the formation of periodic structures with a period of about 0.71 μm was revealed, leading to diffraction effects observed in reflected light. The paper presents theoretically modeled and experimentally confirmed modes of recording structures under the influence of nanosecond radiation. It is shown that varying the parameters of the effect allows localizing oxidation regions, which leads to a change in the contrast of the transmitted light and allows creating halftone rasterized images with specified values of greyscale in the transmitted light. The practical significance of the obtained results is demonstrated by the example of recording an optical element such as a halftone rasterized photomask with a specified geometry and contrast values.

Keywords

rasterized photomasks, thin titanium films, laser thermochemical recording, diffractive optics, laser lithography, laser-induced oxidation, laser-induced periodic surface structures

Acknowledgements

Research was financially supported by the Russian Science Foundation, project No. 24-79-10230, <https://rscf.ru/en/project/24-79-10230/>.

Authors thank ILT PhD student Ibrahim Qosai for helping with experiments.

For citation: Pivovarov A.D., Usynina E.V., Sinev D.A. Direct laser thermochemical writing on titanium films for rasterized images creation. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2025, vol. 25, no. 1, pp. 23–32 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-1-23-32

Введение

Современные исследования в области создания тонких рельефно-фазовых структур представляют особый интерес для записи фотошаблонов и элементов дифракционной (компьютерной) оптики. Дифракционные оптические элементы (ДОЭ) широко используются в системах фотоники, сенсорики и оптоэлектроники, в качестве корректоров и преобразователей волновых фронтов, аналогов рефракционных элементов и т. д. [1–3]. Кроме того, фотошаблоны применяют по прямому назначению в проекционных и теневых литографических схемах формирования ДОЭ [4, 5]. Задачи формирования фазово-амплитудных ДОЭ с заданным профилем зачастую решают с применением полутонковых фотошаблонов с заданной пространственной функцией пропускания [5]. В настоящее время предъявляются высокие требования к технологическим комплексам (устройствам и технологиям) для решения задач дифракционной оптики. Необходимо обеспечивать произвольную и асимметричную конфигурации топологии,

минимальные размеры элементов порядка 100 нм, поле обработки 200–300 мм и более, точность до 1/20 от размера наименьшей дифракционной зоны [6]. Данные требования требуют разработки новых технологий высокоточного и производительного синтеза фотошаблонов и ДОЭ [6].

Известные методы изготовления подобных планарных элементов включают фотолитографию [7, 8], цифровую голографию [9], алмазное точение [10, 11], а также сравнительно новые методы типа наноразмерной 3D-печати [12] и термокапиллярного формования (thermocapillary shaping) [13]. В связи с комплексностью каждого из перечисленных методов сохраняется интерес к простым подходам, позволяющим формировать требуемую топологию прямым сканирующим воздействием сфокусированных пучков излучения. Существенные результаты в области изготовления полутонковых элементов прямой лазерной записью были достигнуты с применением прямой записи на тонкослойных халькогенидных материалах [14–17], а также на тонких пленках кремния Si [3, 18, 19], фоточув-

ствительных стеклах [6, 20–23], и других акцепторных материалах [9, 24, 25], которые требуют специальных подходов к осуществлению записи.

Интерес вызывают работы по лазерному термохимическому воздействию на тонкие пленки металлов, окисляющихся на воздухе с образованием оксидов, прозрачных и оптически нейтральных во всем видимом спектральном диапазоне. Использование в качестве таких исходных материалов металлических пленок, достаточно тонких для лазерно-индуцированного окисления с формированием сквозного контрастного изображения, позволяет сократить количество этапов изготовления фотошаблонов до необходимого минимума (напыление пленки и прямая запись) и смягчить требования к температурным режимам записи. Нелинейные физико-химические обратные связи, проявляющиеся при просветлении пленки в процессе воздействия, усложняют моделирование динамики и предсказание режимов [26–28], но открывают возможность к их использованию для локализации записи. В качестве основных приоритетных материалов для исследований в этой области можно отметить пленки титана [17, 26, 29–37], хрома [38], циркония [39], олова [40–43], индия [16, 44], а также — в отдельных исследованиях — ванадия, цинка, гафния, тантала и др. [45–47]. Заметим, что формирование полутонкого фотошаблона с непрерывной функцией пропускания является неординарной технической задачей [18], которая может быть решена за счет его растривания (преобразования пространственного полутонкого распределения интенсивности в двухуровневое, бинарное изображение) и использования проекционной оптической системы, осуществляющей некогерентную пространственную фильтрацию растриванного изображения. Этот метод, получивший название фоторастрового, позволяет изготавливать высокоэффективные ДОЭ с непрерывным фазовым профилем [5, 45]. Простота фоторастрового метода снижает технические требования, предъявляемые к технологии изготовления фотошаблонов, и дает возможность получить высокое качество изготавливаемых элементов, что делает его из наиболее удачных методов изготовления ДОЭ [5]. При этом существующие работы в области прямой лазерной термохимической записи показывают возможности формирования локальных областей прозрачности в результате окисления тонких пленок металлов [28, 29], которые могли бы быть использованы для фоторастривания. Однако итоговый контраст коэффициента пропускания получаемой структуры оказывается сложно прогнозируемым в связи с комплексностью влияющих факторов (оптических, химических, теплофизических параметров пленки, динамически изменяющихся непосредственно в процессе записи).

В настоящей работе предлагается экспериментальный подход к объединению методов полутонковой термохимической записи и фоторастривания за счет создания структур с управляемой прозрачностью на пленках титана, которые могут составить основу для записи топологий растриванных фотошаблонов.

Материалы и методы

Для исследования прямой лазерной термохимической записи структур был использован технологический комплекс «МиниМаркер-2» на базе волоконного иттербиевого лазера с максимальной средней мощностью 20 Вт. Выбор лазерного источника связан с высоким поглощением излучения образцами (пленками титана) на длине волны $\lambda = 1,07$ мкм, удобной системой управления и развертки пучка (сканирование осуществлялось постоянно в процессе воздействия с заданной скоростью V с помощью встроенной системы гальванометрических сканаторов) и необходимым диапазоном мощностей. В настоящей работе диапазон мощностей P выбран от 60 до 700 мВт при длительности импульса $\tau = 4$ нс, частоте следования импульсов $f = 40$ кГц и диаметрах сфокусированного пучка $d_1 = 50 \pm 1$ мкм и $d_2 = 70 \pm 1$ мкм по уровню e^{-1} [48] в зависимости от положения образца относительно плоскости острой фокусировки. Контроль среднего значения мощности лазерного пучка производился с применением измерителя мощности Gentec-EO SOLO2.

В качестве образцов были использованы пленки титана с толщинами $h = 20, 30$ и 40 нм, нанесенные на кварцевое стекло марки КУ-1 (ООО «Алкор Текнолоджиз», Санкт-Петербург, Россия) методом термического распыления в вакууме. Анализ оптических и геометрических характеристик структур был проведен с применением оптического микроскопа Carl Zeiss Axio Imager A1m.

Обработка данных, полученных при помощи оптического микроскопа, проводилась методом 2D быстрого преобразования Фурье (2D-БПФ) в свободном пространстве программно обеспечении Gwyddion. На основании 2D-БПФ анализа микрофотографий были получены значения периода Λ и упорядоченности $\Delta\Lambda$ периодических структур, зарегистрированных в ряде режимов. Численно-аналитическое моделирование температурных режимов лазерной записи на тонких пленках титана было проведено в системе компьютерной алгебры Mathcad 15.

Результаты

Фотографии массивов рабочих режимов и микрофотографии структур, записанных на пленках титана на кварцевых подложках, приведены на рис. 1. Запись была осуществлена с варьированием значения средней мощности $P = 63–532$ мВт (средней плотности мощности $q = 16–139$ МВт/м² при диаметре пучка $d_2 \approx 70$ мкм) и скоростях сканирования V от 0,1 до 1 мм/с.

На основании анализа структур методом оптической микроскопии удалось визуально выявить основные рабочие режимы (рис. 1):

режим I — структуры характеризуются отсутствием видимого термохимического воздействия излучения на материал без заметного (сквозного) окисления;

режим II — структуры характеризуются частичным окислением пленки с образованием локальных «окон» прозрачности, видимых в проходящем свете;

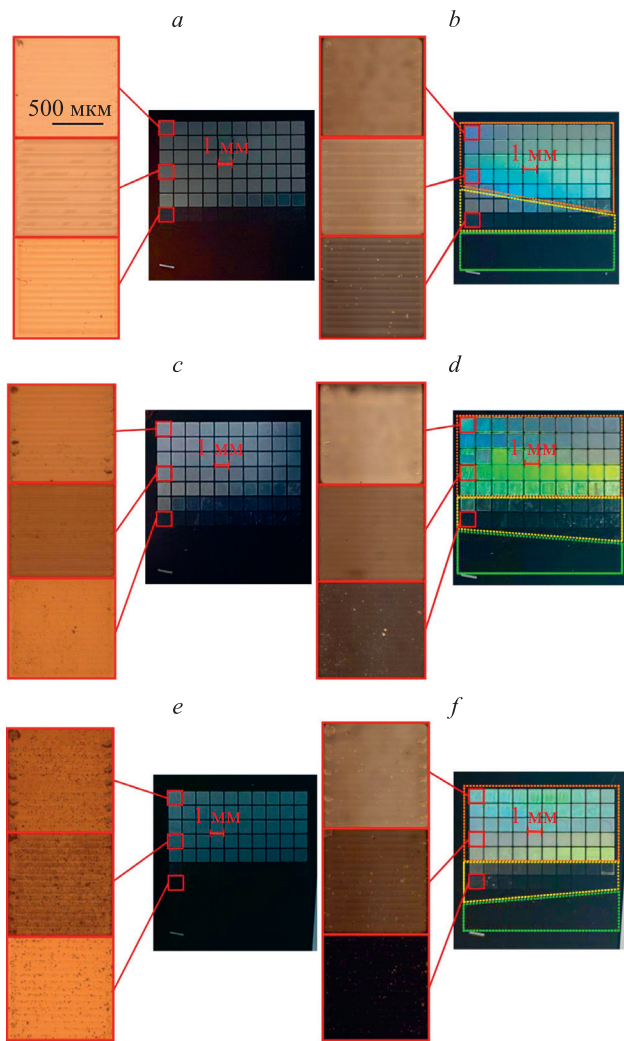


Рис. 1. Карта рабочих режимов термохимической записи для пленки титана толщинами 20 нм (а, б), 30 нм (с, д) и 40 нм (е, ф) в режимах проходящего (а, с, е) и отраженного (б, д, ф) света. На вставках показаны оптические микрофотографии с увеличением $100\times$ для характерных структур, записанных при $V = 0,1$ мм/с и $q = 50, 89$ и 139 МВт/м². Пунктирами отмечены режимы I (зеленый), II (желтый) и III (оранжевый)

Fig. 1. Technological map for thermochemical recording on thin titanium films with thicknesses of 20 nm (a, b), 30 nm (c, d), 40 nm (e, f) as viewed in transmitted (a, c, e) and reflected (b, d, f) light. Insets show the optical microphotos (magnification $100\times$) of the characteristic structures recorded at $V = 0.1$ mm/s and $q = 50, 89,$ and 139 MW/m². Dashed lines show the borders of the regimes I (green), II (yellow), and III (orange)

режим III — соответствующий полному сквозному окислению пленки по всей поверхности облученной области;

режим IV — соответствующий визуально отличимой абляции пленки.

Экспериментально определенные границы режимов записи (значения P и q при воздействии лазерными пучками с $d_1 = 50$ мкм и $d_2 = 70$ мкм) приведены в табл. 1. Для всех пленок наблюдаются примерно одинаковые границы рабочих режимов записи. Например, режим II, характеризующийся частичным локальным

окислением пленки и появлением контрастных (при рассмотрении в проходящем свете) структур, ограничен снизу значениями q порядка 40 МВт/м². При этом структуры, записанные в режиме II, локализованы на пленке и представляют собой чередующиеся полосы переменной прозрачности (рис. 2, а–с). Запись при параметрах воздействия в режиме II позволяет осуществить управление контрастом коэффициента пропускания K формируемой области на заданное значение от 0 до 40 % (рис. 2, d) за счет варьирования коэффициента заполнения D (отношения ширины насковозь окисленной прозрачной области к пространственному периоду записанных треков) от 25 до 85 %, а фактически за счет растривания изображения. При q свыше 90 МВт/м² области с высокой прозрачностью полностью заполняют облученную зону, и все структуры, записанные в режиме III, обладают одинаковым значением контраста $K \approx 40$ % по отношению к исходной пленке.

Отметим, что цвет образца, наблюдаемый при рассмотрении структур в отраженном свете (рис. 1, б, д, ф) связан с дифракцией белого света на образовавшемся субмикронном периодическом рельефе (лазерно-индуцированных поверхностных периодических структур) [33], выступающим в роли дифракционной решетки. Формируемые в пределах лазерного трека рельефы характеризуются пространственным периодом $\Lambda = 0,71 \pm 0,02$ мкм (рис. 3), что хорошо согласуется с результатами работ [33, 37]. Существенной зависимости периода Λ и упорядоченности $\Delta\Lambda$ от толщины исходной пленки выявлено не было. Отметим, что $\Delta\Lambda$ структур повышается при увеличении интенсивности лазерного воздействия в пределах границ режима III. Формирование структур устойчивого периода может составить основу для записи более сложных элементов дифракционной оптики [49].

Обсуждение результатов

Для описания экспериментально выявленных режимов формирования структур было проведено численно-аналитическое моделирование температурных диапазонов записи. Температура пленки к моменту окончания была определена по классической формуле [50]:

$$T = \frac{q_{\text{имп}} A \sqrt{a_2 \tau}}{k_2} \left\{ \frac{2}{\sqrt{\pi}} + \psi [\exp(\psi^2) \operatorname{erfc}(\psi) - 1] \right\} + T_H, \quad (1)$$

где $\psi = \frac{\rho_1 c_1 h}{\rho_2 c_2 \sqrt{a_2 \tau}}$ — коэффициент, определяющий интенсивность теплоотвода из пленки в подложку;

$q_{\text{имп}} = \frac{q}{f\tau}$ — импульсная плотность мощности падающего излучения, f — частота следования импульсов; τ — длительность импульса; ρ — плотность; c — теплоемкость; a — температуропроводность; k — теплопроводность; T_H — начальная температура; $\operatorname{erfc}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_z^\infty e^{-u^2} du$ — дополнительный интеграл вероятности; индекс «1» относится к пленке, «2» — к подложке.

Таблица 1. Экспериментально определенные значения рабочих режимов записи структур
 Table 1. Experimentally verified regimes for structures recording

Режим записи	Мощность P , мВт	Плотность мощности q , МВт/м ²	Мощность P , мВт	Плотность мощности q , МВт/м ²
	диаметр пучка $d_1 = 50 \pm 1$ мкм		диаметр пучка $d_2 = 70 \pm 1$ мкм	
Режим I	—	—	$63 \pm 0,2$	16 ± 1
	—	—	$91 \pm 0,2$	24 ± 1
	$81 \pm 0,2$	42 ± 1	$142 \pm 0,4$	37 ± 1
Режим II	—	—	$190 \pm 0,5$	50 ± 2
	$120 \pm 0,3$	63 ± 2	248 ± 1	65 ± 2
	—	—	291 ± 1	76 ± 2
Режим III	$170 \pm 0,4$	89 ± 3	339 ± 1	89 ± 3
	—	—	392 ± 1	102 ± 3
	230 ± 1	121 ± 4	477 ± 1	125 ± 4
Режим IV	—	—	532 ± 1	139 ± 4
	330 ± 1	173 ± 5	—	—
	390 ± 1	204 ± 6	—	—
	450 ± 1	236 ± 7	—	—
	520 ± 1	272 ± 8	—	—
	590 ± 2	309 ± 9	—	—
	670 ± 2	351 ± 11	—	—

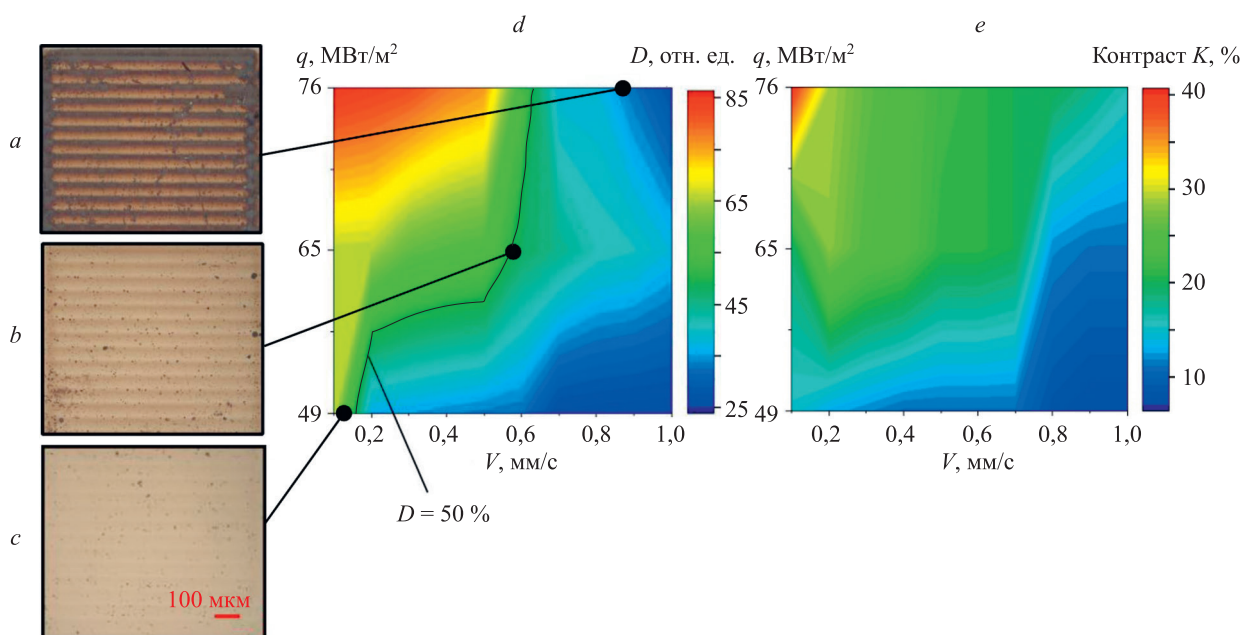


Рис. 2. Микрофотографии структур, записанных при выбранных параметрах воздействия в режиме II (a–c). Контурные графики коэффициента заполнения записанных структур D (d) и значений контраста коэффициента пропускания K в зависимости от параметров записи (e), полученные в результате анализа оптических микрофотографий

Fig. 2. Optical microphotos of the structures recorded with the selected lasing parameters within the Regime II (a–c). Contour graphs for the duty factor D of the recorded structures (d) and transmission coefficient contrast K depending on the recording parameters found by the optical microphotos analysis (e)

Поглощательная способность материала пленки A определена для двух крайних случаев (исходной металлической и полностью окисленной пленок), определяющих верхние и нижние пределы точности расчетных оценок. Справочные сведения об оптических и тепло-

физических характеристиках материалов, использованных в расчетах, приведены в табл. 2.

Сопоставление границ режимов записи, полученных экспериментально и рассчитанных по формуле (1), приведено на рис. 4. Нижние и верхние границы

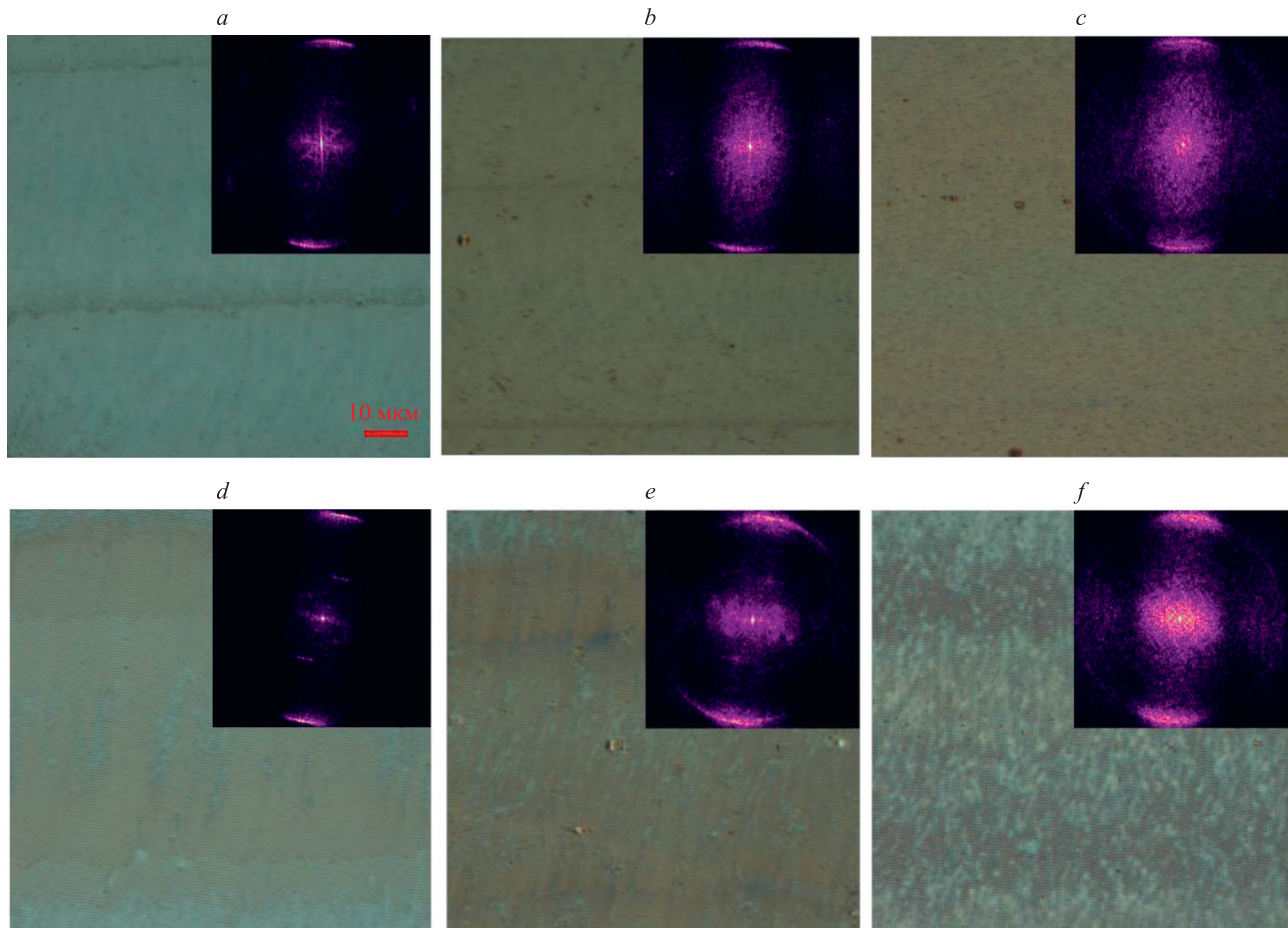


Рис. 3. Микрофотографии структур, записанных на образцах пленок толщинами 20 нм (a, d), 30 нм (b, e) и 40 нм (c, f) при плотностях мощности 89 МВт/м² (a–c) и 139 МВт/м² (d–f) и при скорости сканирования лазерного пучка 1 мм/с. Масштаб одинаковый на всех микрофотографиях. На вставках приведены изображения, полученные методом 2D быстрого преобразования Фурье соответствующих микрофотографий. Границы вставок соответствуют пространственной частоте $\pm 1,5 \text{ мкм}^{-1}$

Fig. 3. Microphotos of structures recorded on film samples with thicknesses of 20 nm, 30 nm, and 40 nm with power densities of 89 MW/m² (a–c) and 139 MW/m² (d–f) and scanning speed 1 mm/s. Scale bar is the same for all the microphotos. 2D-FFT analysis images for each microphoto are shown in the insets. Insets borders correspond to spatial frequency of $\pm 1.5 \text{ }\mu\text{m}^{-1}$

Таблица 2. Теплофизические и оптические характеристики материалов [27, 28]

Table 2. Thermal and optical parameters of the materials [27, 28]

Характеристика	Материал	
	пленка	подложка
	титан (при нормальных условиях, $h = 40 \text{ нм}$)	кварц КУ-1
k , Вт/(м·К)	19	1,4
ρ , кг/м ³	4505	2600
c , Дж/(кг·К)	523	750
$a \cdot 10^{-6}$, м ² /с	8	0,7
$T_{\text{пл}}$, К	1941	—
$T_{\text{кип}}$, К	3560	—
A	0,4	—

окрашенных областей соответствуют пороговым значениям, определенным при значениях поглощательной способности A для металлической и оксидной пленок. Экспериментальные и расчетные значения хорошо коррелируют между собой для пленок всех изученных толщин.

В ходе проведенного эксперимента были определены режимы формирования структур, которые позволили сформировать прототип защитных элементов, каждый фрагмент которого записан в различных режимах на пленке титана толщиной 30 нм. На рис. 5, d, e, представлен образец в отраженном и проходящем свете, записанный по подобранным режимам (рис. 5, b, c). Визуально образец имеет некоторые отклонения от ожидаемого результата, что предположительно связано с локальной дефектностью пленки при напылении или не точным позиционированием плоскости фокусировки при записи, что может быть устранено на более поздних уровнях готовности технологии.

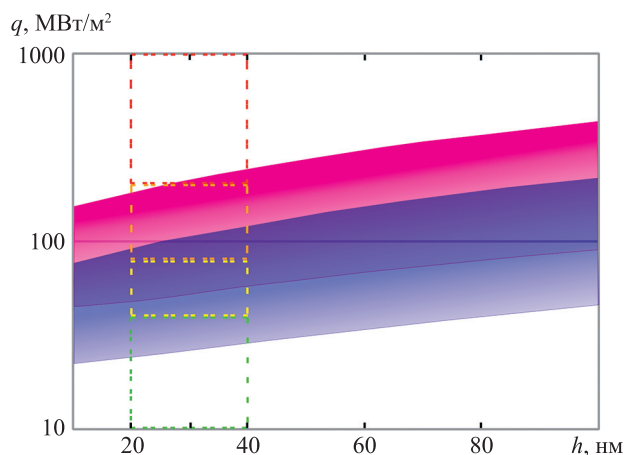


Рис. 4. График зависимости плотности мощности лазерного излучения, необходимой для нагревания пленки титана до $T_{пл}$ (синяя область) и $T_{кип}$ (розовая область), от исходной толщины пленки h . Пунктирами отмечены режимы I (зеленый), II (желтый), III (оранжевый) и IV (красный)

Fig. 4. Dependence of the laser power density, required to heat the titanium film of various thickness to melting (blue region) and boiling (pink region) points. Dashed lines show the borders of the regimes I (green), II (yellow), III (orange), and IV (red)

Заклучение

Представлен подход к созданию структур управляемыми значениями контраста коэффициента пропускания (в проходящем свете) и с дифракционными эффектами (в отраженном свете) за счет прямой лазерной термохимической записи на тонких пленках титана.

Теоретически смоделированы и экспериментально подтверждены режимы записи структур при воздействии импульсов наносекундной длительности. Формирование контрастных структур происходит в диапазонах плотности мощности около 15–140 МВт/м² при сканировании со скоростями от 0,1 до 1 мм/с. Режимы формирования структур (частичного окисления, сквозного окисления, абляции) выявлены при двух различных положениях фокусировки, при этом основные закономерности совпали как качественно, так и количественно.

Определены значения плотности мощности, позволяющие управляемо изменять значение контраста

Литература

1. Иванов С.А., Доан Ван Бак, Игнатиев А.И., Никоноров Н.В. Особенности записи наложенных голограмм в фото-термо-рефрактивном стекле // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16. № 3. С. 428–435. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2016-16-3-428-435>
2. Rathsack B.M., Tabery C.E., Scheer S.A., Pochkowski M., Philbin C., Kalk F., Henderson C.L., Buck P.D., Willson C.G. Optical lithography simulation and photoresist optimization for photomask fabrication // Proceedings of SPIE. 1999. V. 3678. P. 1215–1226. <https://doi.org/10.1117/12.350173>
3. Koronkevich V.P., Kiryanov V.P., Korol'kov V.P., Poleshchuk A.G., Cherkashin V.V., Churin E.G., Kharisov A.A. Fabrication of diffractive optical elements by direct laser-writing with circular scanning //

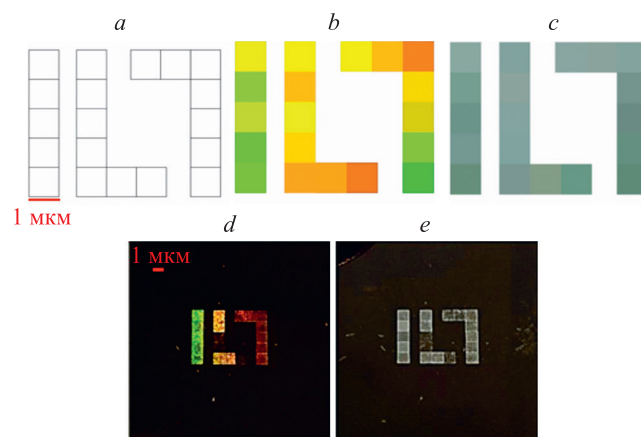


Рис. 5. Схема логотипа Института лазерных технологий Университета ИТМО: общий вид схемы, состоящей из одинаковых элементов равного размера (а), логотип в отраженном (b) и проходящем (c) свете, каждый элемент которого записан в своем рабочем режиме. Фотографии образца в отраженном (d) и проходящем (e) свете при заданных режимах (рис. 1)

Fig. 5. The Institute of Laser Technologies logo sketch: general view of the sketch consisting of identical elements of equal size (a), the logo in reflected (b) and transmitted (c) light, each element of which recorded in its own processing regime (b, c). Photo of the sample in reflected (d) and in transmitted light (e) at the previously specified regimes (Fig. 1)

коэффициента пропускания структур (порядка 50–90 МВт/м², режим II). За счет формирования структур с различным значением пространственного разрешения записи (растрирования) показана возможность записи структур с заданными характеристиками прозрачности. Контраст коэффициента пропускания таких структур относительно исходного значения прозрачности пленки управляемо варьируется от 1 до 40 %. При этом на пленках формируется субмикронный рельеф, картина дифракции белого света на котором, наблюдаемая при рассмотрении в отраженном свете, во многом зависит от взаимного положения образца и источника облучения, что совпадает с ранее полученными результатами [37].

Применение выявленных режимов было продемонстрировано на примере записи оптического элемента типа полутонового растрированного фотошаблона с заданной геометрий и значениями контраста.

References

1. Ivanov S.A., Doan Van Bac, Ignatiev A.I., Nikonorov N.V. Features of multiplexed holograms recording in photo-thermo-refractive glass. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2016, vol. 16, no. 3, pp. 428–435. (in Russian). <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2016-16-3-428-435>
2. Rathsack B.M., Tabery C.E., Scheer S.A., Pochkowski M., Philbin C., Kalk F., Henderson C.L., Buck P.D., Willson C.G. Optical lithography simulation and photoresist optimization for photomask fabrication. *Proceedings of SPIE*, 1999, vol. 3678, pp. 1215–1226. <https://doi.org/10.1117/12.350173>
3. Koronkevich V.P., Kiryanov V.P., Korol'kov V.P., Poleshchuk A.G., Cherkashin V.V., Churin E.G., Kharisov A.A. Fabrication of diffractive optical elements by direct laser-writing with circular scanning //

- Proceedings of SPIE, 1995, V. 2363, P. 290–297. <https://doi.org/10.1117/12.199647>
4. Зорич Н.Д., Лившиц И.Л., Соколова Е.А. Преимущества использования дифракционных оптических элементов в простых оптических изображающих системах // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Т. 15. № 1. С. 6–13. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2015-15-1-6-13>
 5. Поleshchuk A.G. Методы формирования профиля поверхности дифракционных оптических элементов // Компьютерная оптика. 1996. № 16. С. 54–61.
 6. Veiko V.P., Korolkov V.P., Poleshchuk A.G., Sinev D.A., Shakhno E.A. Laser technologies in micro-optics. Part I. Fabrication of diffractive optical elements and photomasks with amplitude transmission // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. 2017. V. 53. N 5. P. 474–483. <https://doi.org/10.3103/S8756699017050077>
 7. Knoblich M., Uwurukundo X., Stumpf D., Kraus M., Hillmer H., Brunner R. Annular gray tone lithography for the fabrication of rotationally symmetric continuous relief meso- and microscale optical elements // Photonics. 2023. V. 10. N 9. P. 1000. <https://doi.org/10.3390/photonics10091000>
 8. Li J., Ge S., Liu W. High-efficiency and high-precision replication manufacturing of large-aperture multi-level diffractive lenses // Proceedings of SPIE. 2023. V. 12963. P. 129631I. <https://doi.org/10.1117/12.3007883>
 9. Oscurato S., Reda F., Salvatore M., Borbone F., Maddalena P., Ambrosio A. Shapeshifting diffractive optical devices // Laser & Photonics Reviews. 2021. V. 16. N 4. P. 2100514. <https://doi.org/10.1002/lpor.202100514>
 10. Медунецкий В.М., Солк С.В. Опыт применения и перспективы технологии алмазного микроточения // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2014. № 1(89). С. 165–170.
 11. Zhang J., Li X., Fu Y., Zheng Y., Mo H., Chen X., Xiao J., Xu J. Improved machinability of single crystal silicon by applying in-situ laser-vibration hybrid assisted diamond cutting // Journal of Materials Processing Technology. 2024. V. 326. P. 118343. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2024.118343>
 12. Wang H., Wang H., Zhang W., Yang, J. Toward Near-Perfect Diffractive Optical Elements via Nanoscale 3D Printing // ACS Nano. 2020. V. 14. N 8. P. 10452–10461. <https://doi.org/10.1021/acsnano.0c04313>
 13. Eshe R., Frumkin V., Nice M., Luria O., Ferdman B., Opatovski N., Gommed K., Shusteff M., Shechtman Y., Bercovici M. Programmable thermocapillary shaping of thin liquid films // Flow. 2022. V. 2. P. E27. <https://doi.org/10.1017/flo.2022.17>
 14. Елисеев Н.Н., Невзоров А.А., Михалевский В.А., Киселев А.В., Бурцев А.А., Ионин В.В., Лотин А.А. Переключение электрических свойств тонкопленочных мемристивных элементов на основе GeTe последовательностями сверхкоротких лазерных импульсов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2023. Т. 23. № 5. С. 911–919. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2023-23-5-911-919>
 15. Koreshev S.N., Ratushnyi V.P. Short-wave boundary of applicability of relief-phase reflecting holograms on a thin film of a chalcogenide glassy semiconductor // Proceedings of SPIE. 2013. V. 8644. P. 86440W. <https://doi.org/10.1117/12.981446>
 16. Dykes J.M., Plesa C., Chapman G.H. Enhancing direct-write laser control techniques for bimetallic grayscale photomasks // Proceedings of SPIE. 2008. V. 6883. P. 688312. <https://doi.org/10.1117/12.765006>
 17. Wang R., Wei J., Fan Y. Chalcogenide phase-change thin films used as grayscale photolithography materials // Optics express. 2014. V. 22. N 5. P. 4973–4984. <https://doi.org/10.1364/OE.22.004973>
 18. Gotchiyaev V.Z., Korolkov V.P., Sokolov A.P., Chernukhin V.P. High resolution optical recording on a-Si films // Journal of Non-Crystalline Solids. 1991. V. 137–138. Part. 2. P. 1297–1300. [https://doi.org/10.1016/S0022-3093\(05\)80361-8](https://doi.org/10.1016/S0022-3093(05)80361-8)
 19. Гочияев В.З., Корольков В.П., Соколов А.П., Чернухин В.П. Полудюновая оптическая запись на пленках a-Si // Квантовая электроника. 1989. Т. 16. № 11. С. 2343–2348.
 20. Акишина Е.Ю., Лазарева К.Е., Никонов Н.В., Сидоров А.И., Цехомский В.А. Влияние галогенов на спектральные и фоточувствительные свойства фото-термо-рефрактивных стекол // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. 2009. № 2(60). С. 5–16. scanning. *Proceedings of SPIE*, 1995, vol. 2363, pp. 290–297. <https://doi.org/10.1117/12.199647>
 4. Zoric N.Dj., Livshits I.L., Sokolova E.A. Advantages of diffractive optical elements application in simple optical imaging systems. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2015, vol. 15, no. 1, pp. 6–13. (in Russian). <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2015-15-1-6-13>
 5. Poleshchuk A.G. Methods of fabricating the surface profile of diffractive optical elements. *Computer Optics*, 1996, no. 16, pp. 54–61. (in Russian)
 6. Veiko V.P., Korolkov V.P., Poleshchuk A.G., Sinev D.A., Shakhno E.A. Laser technologies in micro-optics. Part I. Fabrication of diffractive optical elements and photomasks with amplitude transmission. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2017, vol. 53, no. 5, pp. 474–483. <https://doi.org/10.3103/S8756699017050077>
 7. Knoblich M., Uwurukundo X., Stumpf D., Kraus M., Hillmer H., Brunner R. Annular gray tone lithography for the fabrication of rotationally symmetric continuous relief meso- and microscale optical elements. *Photonics*, 2023, vol. 10, no. 9, pp. 1000. <https://doi.org/10.3390/photonics10091000>
 8. Li J., Ge S., Liu W. High-efficiency and high-precision replication manufacturing of large-aperture multi-level diffractive lenses. *Proceedings of SPIE*, 2023, vol. 12963, pp. 129631I. <https://doi.org/10.1117/12.3007883>
 9. Oscurato S., Reda F., Salvatore M., Borbone F., Maddalena P., Ambrosio A. Shapeshifting diffractive optical devices. *Laser & Photonics Reviews*, 2021, vol. 16, no. 4, pp. 2100514. <https://doi.org/10.1002/lpor.202100514>
 10. Medunetskiy V., Solk S. Application experience and prospects of diamond micro-turning technology // *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2014, no. 1(89), pp. 165–170. (in Russian)
 11. Zhang J., Li X., Fu Y., Zheng Y., Mo H., Chen X., Xiao J., Xu J. Improved machinability of single crystal silicon by applying in-situ laser-vibration hybrid assisted diamond cutting. *Journal of Materials Processing Technology*, 2024, vol. 326, pp. 118343. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2024.118343>
 12. Wang H., Wang H., Zhang W., Yang, J. Toward Near-Perfect Diffractive Optical Elements via Nanoscale 3D Printing. *ACS Nano*, 2020, vol. 14, no. 8, pp. 10452–10461. <https://doi.org/10.1021/acsnano.0c04313>
 13. Eshe R., Frumkin V., Nice M., Luria O., Ferdman B., Opatovski N., Gommed K., Shusteff M., Shechtman Y., Bercovici M. Programmable thermocapillary shaping of thin liquid films. *Flow*, 2022, vol. 2, pp. E27. <https://doi.org/10.1017/flo.2022.17>
 14. Eliseev N.N., Nevzorov A.A., Mikhalevsky V.A., Kiselev A.V., Burtsev A.A., Ionin V.V., Lotin A.A. Switching the electrical properties of thin-film memristive elements based on GeTe by sequences of ultrashort laser pulses. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2023, vol. 23, no. 5, pp. 911–919. (in Russian). <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2023-23-5-911-919>
 15. Koreshev S.N., Ratushnyi V.P. Short-wave boundary of applicability of relief-phase reflecting holograms on a thin film of a chalcogenide glassy semiconductor. *Proceedings of SPIE*, 2013, vol. 8644, pp. 86440W. <https://doi.org/10.1117/12.981446>
 16. Dykes J.M., Plesa C., Chapman G.H. Enhancing direct-write laser control techniques for bimetallic grayscale photomasks. *Proceedings of SPIE*, 2008, vol. 6883, pp. 688312. <https://doi.org/10.1117/12.765006>
 17. Wang R., Wei J., Fan Y. Chalcogenide phase-change thin films used as grayscale photolithography materials. *Optics express*, 2014, vol. 22, no. 5, pp. 4973–4984. <https://doi.org/10.1364/OE.22.004973>
 18. Gotchiyaev V.Z., Korolkov V.P., Sokolov A.P., Chernukhin V.P. High resolution optical recording on a-Si films. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 1991, vol. 137–138, part. 2, pp. 1297–1300. [https://doi.org/10.1016/S0022-3093\(05\)80361-8](https://doi.org/10.1016/S0022-3093(05)80361-8)
 19. Gochiyaev V.Z., Korol'kov V.P., Sokolov A.P., Chernukhin V.P. Half-tone optical storage in a-Si films. *Soviet Journal of Quantum Electronics*, 1989, vol. 19, no. 11, pp. 1506–1509. <https://doi.org/10.1070/QE1989v019n11ABEH009597>
 20. Akishina E., Lazareva K., Nikonov N.V., Sidorov A.I., Tsekhomsky V. Effect of halogens on spectral and photosensitive properties of photo-thermo-refractive glasses. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2009, no. 2(60), pp. 5–16. (in Russian)

21. Korolkov V.P., Malyshev A.I., Nikitin V.G., Poleshchuk A.G., Kharisov A.A., Cherkashin V.V. Application of gray-scale LDW-glass masks for fabrication of high-efficiency does // *Proceedings of SPIE*. 1999. V. 3633. P. 129–138. <https://doi.org/10.1117/12.349316>
22. Korolkov V. P., Malyshev A.I., Poleshchuk A.G., Cherkashin V.V., Tiziani H.J., Pruss C., Schoder T., Westhauser J., Wu C. Fabrication of gray-scale masks and diffractive optical elements with LDW-glass // *Proceedings of SPIE*. 2001. V. 4440. P. 73–84. <https://doi.org/10.1117/12.448026>
23. Корольков В.П., Малышев А.И., Никитин В.Г., Поleshchuk А.Г., Харисов А.А., Черкашин В.В., Ву Ч. Полупрозрачные фотошаблоны на основе LDW-стекло // *Автометрия*. 1998. № 6. С. 27–37.
24. Zhestkij N.A., Efimova A.S., Kenzhebayeva Y., Povarov S.A., Alekseevskiy P.V., Rzhnevskiy S.S., Shipilovskikh S.A., Milichko V.A. Grayscale to multicolor laser writing inside a Label-Free Metal-Organic frameworks // *Advanced Functional Materials*. 2024. V. 34. N 30. P. 2311235. <https://doi.org/10.1002/adfm.202311235>
25. Low M., Lee H., Lim C., Sandeep C., Murukeshan V., Kim S., Kim Y. Laser-induced reduced-graphene-oxide micro-optics patterned by femtosecond laser direct writing // *Applied Surface Science*. 2020. V. 526. P. 146647. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.146647>
26. Gorbunov A.A., Eichler H., Pompe W., Huey B. Lateral self-limitation in the laser-induced oxidation of ultrathin metal films // *Applied Physics Letters*. 1996. V. 69. N 19. P. 2816–2818. <https://doi.org/10.1063/1.116853>
27. Shakhno E.A., Nguyen Q.D., Sinev D., Veiko V.P. Lateral proximity effect in direct laser thermochemical recording on thin titanium films // *Optical and Quantum Electronics*. 2023. V. 55. N 6. P. 502. <https://doi.org/10.1007/s11082-023-04801-0>
28. Shakhno E.A., Nguyen Q., Sinev D.A., Veiko V.P. Proximity-effect-related reduction of the minimum element size in thermochemical laser writing // *Journal of Optical Technology*. 2022. V. 89. N 6. P. 312–319. <https://doi.org/10.1364/JOT.89.000312>
29. Shakhno E.A., Sinev D.A., Kulazhkin A.M. Features of laser oxidation of thin films of titanium // *Journal of Optical Technology*. 2014. V. 81. N 5. P. 298–302. <https://doi.org/10.1364/JOT.81.000298>
30. Veiko V.P., Shakhno E.A., Sinev D.A. Laser thermochemical writing: pursuing the resolution // *Optical and Quantum Electronics*. 2016. V. 48. N 6. P. 322. <https://doi.org/10.1007/s11082-016-0594-y>
31. Veiko V.P., Nguyen Q., Shakhno E.A., Sinev D.A., Lebedeva E.V. Physical similarity of the processes of laser thermochemical recording on thin metal films and modeling the recording of submicron structures // *Optical and Quantum Electronics*. 2019. V. 51. N 11. P. 348. <https://doi.org/10.1007/s11082-019-2073-8>
32. Veiko V.P., Zakoldaev R.A., Shakhno E.A., Sinev D.A., Nguyen Z.K., Baranov A.V., Bogdanov K.V., Gedvilas M., Raciukaitis G., Vishnevskaya L.V., Degtyareva E.N. Thermochemical writing with high spatial resolution on Ti films utilising picosecond laser // *Optical Materials Express*. 2019. V. 9. N 6. P. 2729–2737. <https://doi.org/10.1364/OME.9.002729>
33. Sinev D.A., Yuzhakova D.S., Moskvina M.K., Veiko V.P. Formation of the submicron oxidative LIPSS on thin titanium films during nanosecond laser recording // *Nanomaterials*. 2020. V. 10. N 11. P. 2161. <https://doi.org/10.3390/nano10112161>
34. Nguyen Q., Shakhno E.A., Sinev D.A., Zakoldaev R.A., Veiko V.P. Forming microstructures of certain transparency on thin titanium films by laser thermochemical method // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. V. 1822. N 1. P. 012006. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1822/1/012006>
35. Shakhno E.A., Nguyen Q., Sinev D.A., Matvienko E., Zakoldaev R.A., Veiko V.P. Laser thermochemical high-contrast recording on thin metal films // *Nanomaterials*. 2021. V. 11. N 1. P. 67. <https://doi.org/10.3390/nano11010067>
36. Xia F., Jiao L.P., Wu D., Li S., Zhang K., Kong W., Yun M., Liu Q., Zhang X. Mechanism of pulsed-laser-induced oxidation of titanium films // *Optical Materials Express*. 2019. V. 9. N 10. P. 4097–4103. <https://doi.org/10.1364/OME.9.004097>
37. Ibrahim Q., Andreeva Y., Suvorov A., Khmelenin D., Grigoryev E., Shcherbakov A.A., Sinev D. Laser fabrication of 1D and 2D periodic subwavelength gratings on titanium films // *Optics and Laser Technology*. 2024. V. 174. P. 110642. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2024.110642>
38. Poleshchuk A.G., Korolkov V.P., Sedukhin A.G., Sametov A.R., Shimanskii R.V. Direct laser writing of gray-scale microimages with a large dynamic range in chromium films // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. 2015. V. 51. N 3. P. 287–292. <https://doi.org/10.3103/S8756699015030115>
21. Korolkov V.P., Malyshev A.I., Nikitin V.G., Poleshchuk A.G., Kharisov A.A., Cherkashin V.V. Application of gray-scale LDW-glass masks for fabrication of high-efficiency does. *Proceedings of SPIE*, 1999, vol. 3633, pp. 129–138. <https://doi.org/10.1117/12.349316>
22. Korolkov V. P., Malyshev A.I., Poleshchuk A.G., Cherkashin V.V., Tiziani H.J., Pruss C., Schoder T., Westhauser J., Wu C. Fabrication of gray-scale masks and diffractive optical elements with LDW-glass. *Proceedings of SPIE*, 2001, vol. 4440, pp. 73–84. <https://doi.org/10.1117/12.448026>
23. Korolkov V.P., Malyshev A.I., Nikitin V.G., Poleshchuk A.G., Kharisov A.A., Cherkashin V.V., Wu Ch. Gray-scale masks based on LDW glasses. *Avtometriya*, 1998, no. 6, pp. 27–37. (in Russian)
24. Zhestkij N.A., Efimova A.S., Kenzhebayeva Y., Povarov S.A., Alekseevskiy P.V., Rzhnevskiy S.S., Shipilovskikh S.A., Milichko V.A. Grayscale to multicolor laser writing inside a Label-Free Metal-Organic frameworks. *Advanced Functional Materials*, 2024, vol. 34, no. 30, pp. 2311235. <https://doi.org/10.1002/adfm.202311235>
25. Low M., Lee H., Lim C., Sandeep C., Murukeshan V., Kim S., Kim Y. Laser-induced reduced-graphene-oxide micro-optics patterned by femtosecond laser direct writing. *Applied Surface Science*, 2020, vol. 526, pp. 146647. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.146647>
26. Gorbunov A.A., Eichler H., Pompe W., Huey B. Lateral self-limitation in the laser-induced oxidation of ultrathin metal films. *Applied Physics Letters*. 1996. vol. 69, no. 19, pp. 2816–2818. <https://doi.org/10.1063/1.116853>
27. Shakhno E.A., Nguyen Q.D., Sinev D., Veiko V.P. Lateral proximity effect in direct laser thermochemical recording on thin titanium films. *Optical and Quantum Electronics*, 2023, vol. 55, no. 6, pp. 502. <https://doi.org/10.1007/s11082-023-04801-0>
28. Shakhno E.A., Nguyen Q., Sinev D.A., Veiko V.P. Proximity-effect-related reduction of the minimum element size in thermochemical laser writing. *Journal of Optical Technology*, 2022, vol. 89, no. 6, pp. 312–319. <https://doi.org/10.1364/JOT.89.000312>
29. Shakhno E.A., Sinev D.A., Kulazhkin A.M. Features of laser oxidation of thin films of titanium. *Journal of Optical Technology*, 2014, vol. 81, no. 5, pp. 298–302. <https://doi.org/10.1364/JOT.81.000298>
30. Veiko V.P., Shakhno E.A., Sinev D.A. Laser thermochemical writing: pursuing the resolution. *Optical and Quantum Electronics*, 2016, vol. 48, no. 6, pp. 322. <https://doi.org/10.1007/s11082-016-0594-y>
31. Veiko V.P., Nguyen Q., Shakhno E.A., Sinev D.A., Lebedeva E.V. Physical similarity of the processes of laser thermochemical recording on thin metal films and modeling the recording of submicron structures. *Optical and Quantum Electronics*, 2019, vol. 51, no. 11, pp. 348. <https://doi.org/10.1007/s11082-019-2073-8>
32. Veiko V.P., Zakoldaev R.A., Shakhno E.A., Sinev D.A., Nguyen Z.K., Baranov A.V., Bogdanov K.V., Gedvilas M., Raciukaitis G., Vishnevskaya L.V., Degtyareva E.N. Thermochemical writing with high spatial resolution on Ti films utilising picosecond laser. *Optical Materials Express*, 2019, vol. 9, no. 6, pp. 2729–2737. <https://doi.org/10.1364/OME.9.002729>
33. Sinev D.A., Yuzhakova D.S., Moskvina M.K., Veiko V.P. Formation of the submicron oxidative LIPSS on thin titanium films during nanosecond laser recording. *Nanomaterials*, 2020, vol. 10, no. 11, pp. 2161. <https://doi.org/10.3390/nano10112161>
34. Nguyen Q., Shakhno E.A., Sinev D.A., Zakoldaev R.A., Veiko V.P. Forming microstructures of certain transparency on thin titanium films by laser thermochemical method. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 1822, no. 1, pp. 012006. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1822/1/012006>
35. Shakhno E.A., Nguyen Q., Sinev D.A., Matvienko E., Zakoldaev R.A., Veiko V.P. Laser thermochemical high-contrast recording on thin metal films. *Nanomaterials*, 2021, vol. 11, no. 1, pp. 67. <https://doi.org/10.3390/nano11010067>
36. Xia F., Jiao L.P., Wu D., Li S., Zhang K., Kong W., Yun M., Liu Q., Zhang X. Mechanism of pulsed-laser-induced oxidation of titanium films. *Optical Materials Express*, 2019, vol. 9, no. 10, pp. 4097–4103. <https://doi.org/10.1364/OME.9.004097>
37. Ibrahim Q., Andreeva Y., Suvorov A., Khmelenin D., Grigoryev E., Shcherbakov A.A., Sinev D. Laser fabrication of 1D and 2D periodic subwavelength gratings on titanium films. *Optics and Laser Technology*, 2024, vol. 174, pp. 110642. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2024.110642>
38. Poleshchuk A.G., Korolkov V.P., Sedukhin A.G., Sametov A.R., Shimanskii R.V. Direct laser writing of gray-scale microimages with a large dynamic range in chromium films. *Optoelectronics*,

39. Korolov V.P., Sedukhin A.G., Mikerin, S.L. Technological and optical methods for increasing the spatial resolution of thermochemical laser writing on thin metal films // *Optical and Quantum Electronics*. 2019. V. 51. N 12. P. 389. <https://doi.org/10.1007/s11082-019-2111-6>
40. Guo C.F., Cao S., Jiang P., Fang Y., Zhang J., Fan Y., Wang Y., Xu W., Zhao Z., Liu Q. Grayscale photomask fabricated by laser direct writing in metallic nano-films // *Optics Express*. 2009. V. 17. N 22. P. 19981–19987. <https://doi.org/10.1364/OE.17.019981>
41. Guo C.F., Zhang J.M., Miao J.J., Fan Y.T., Liu Q. MTMO grayscale photomask // *Optics Express*. 2010. V. 18. N 3. P. 2621–2631. <https://doi.org/10.1364/OE.18.002621>
42. Xia F., Zhang X., Wang M., Yi S.M., Liu Q., Xu J.J. Numerical analysis of the sub-wavelength fabrication of MTMO grayscale photomasks by direct laser writing // *Optics Express*. 2014. V. 22. N 14. P. 16889–16896. <https://doi.org/10.1364/OE.22.016889>
43. Xia F., Zhang K., Li S., Yun M., Kong W., Zhang X., Liu Q. Simulation of the laser-induced oxidation process in fabricated Sn-MTMO grayscale photomasks // *OSA Continuum*. 2021. V. 4. N 1. P. 65–71. <https://doi.org/10.1364/OSAC.411797>
44. Xia F., Zhang X., Wang M., Liu Q., Xu J.J. Analysis of the laser oxidation kinetics process of In-In2O3 MTMO photomasks by laser direct writing // *Optics Express*. 2015. V. 23. N 22. P. 29193–29201. <https://doi.org/10.1364/OE.23.029193>
45. Korolov V.P., Nasyrov R.K., Sametov A.R., Malyshev A.I., Belousov D.A., Mikerin S.L., Kuts R.I. Direct laser writing of high-NA computer-generated holograms on metal films of the titanium group and chromium // *Proceedings of SPIE*. 2019. V. 11188. P. 111880R. <https://doi.org/10.1117/12.2537269>
46. Belousov D.A., Bronnikov K.A., Okotrub K.A., Mikerin S.L., Korolov V.P., Terentyev V.S., Dostovalov A.V. Thermochemical Laser-Induced Periodic Surface Structures formation by femtosecond laser on Hf thin films in air and vacuum // *Materials*. 2021. V. 14. N 21. P. 6714. <https://doi.org/10.3390/ma14216714>
47. Korolov V.P., Sedukhin A.G., Belousov D.A., Shimansky R.V., Khomutov V.N., Mikerin S.L., Spesivtsev E.V., Kutz, R.I. Increasing the spatial resolution of direct laser writing of diffractive structures on thin films of titanium group metals // *Proceedings of SPIE*. 2019. V. 11030. P. 110300A. <https://doi.org/10.1117/12.2520978>
48. Ponkratova E.Y., Kuzmichev A.M., Rud D.A., Khubezhov S.A., Dolgintsev D.M., Ageev E.I., Veiko V.P., Sinev D.A., Zuev D.A. Nanosecond Laser-Assisted Fabrication of photocatalytically active TiO₂ nanocoatings: Implication in organic dyes degradation // *ACS Applied Nano Materials*. 2024. V. 7. N 16. P. 19268–19278. <https://doi.org/10.1021/acsnm.4c03155>
49. Kozlova E., Kotlyar V. Ultrashort laser pulse focusing by amplitude and phase zone plates // *Photonics*. 2022. V. 9. N 9. P. 662. <https://doi.org/10.3390/photonics9090662>
50. Либенсон М.Н. Нагрев и разрушение тонких пленок излучением ОКГ // *Физика и химия обработки материалов*. 1968. № 2. С. 3–11.
- Instrumentation and Data Processing*, 2015, vol. 51, no. 3, pp. 287–292. <https://doi.org/10.3103/S8756699015030115>
39. Korolov V.P., Sedukhin A.G., Mikerin, S.L. Technological and optical methods for increasing the spatial resolution of thermochemical laser writing on thin metal films. *Optical and Quantum Electronics*. 2019, vol. 51, no. 12, pp. 389. <https://doi.org/10.1007/s11082-019-2111-6>
40. Guo C.F., Cao S., Jiang P., Fang Y., Zhang J., Fan Y., Wang Y., Xu W., Zhao Z., Liu Q. Grayscale photomask fabricated by laser direct writing in metallic nano-films. *Optics Express*, 2009, vol. 17, no. 22, pp. 19981–19987. <https://doi.org/10.1364/OE.17.019981>
41. Guo C.F., Zhang J.M., Miao J.J., Fan Y.T., Liu Q. MTMO grayscale photomask. *Optics Express*, 2010, vol. 18, no. 3, pp. 2621–2631. <https://doi.org/10.1364/OE.18.002621>
42. Xia F., Zhang X., Wang M., Yi S.M., Liu Q., Xu J.J. Numerical analysis of the sub-wavelength fabrication of MTMO grayscale photomasks by direct laser writing. *Optics Express*, 2014, vol. 22, no. 14, pp. 16889–16896. <https://doi.org/10.1364/OE.22.016889>
43. Xia F., Zhang K., Li S., Yun M., Kong W., Zhang X., Liu Q. Simulation of the laser-induced oxidation process in fabricated Sn-MTMO grayscale photomasks. *OSA Continuum*, 2021, vol. 4, no. 1, pp. 65–71. <https://doi.org/10.1364/OSAC.411797>
44. Xia F., Zhang X., Wang M., Liu Q., Xu J.J. Analysis of the laser oxidation kinetics process of In-In2O3 MTMO photomasks by laser direct writing. *Optics Express*, 2015, vol. 23, no. 22, pp. 29193–29201. <https://doi.org/10.1364/OE.23.029193>
45. Korolov V.P., Nasyrov R.K., Sametov A.R., Malyshev A.I., Belousov D.A., Mikerin S.L., Kuts R.I. Direct laser writing of high-NA computer-generated holograms on metal films of the titanium group and chromium. *Proceedings of SPIE*. 2019, vol. 11188, pp. 111880R. <https://doi.org/10.1117/12.2537269>
46. Belousov D.A., Bronnikov K.A., Okotrub K.A., Mikerin S.L., Korolov V.P., Terentyev V.S., Dostovalov A.V. Thermochemical Laser-Induced Periodic Surface Structures formation by femtosecond laser on Hf thin films in air and vacuum. *Materials*, 2021, vol. 14, no. 21, pp. 6714. <https://doi.org/10.3390/ma14216714>
47. Korolov V.P., Sedukhin A.G., Belousov D.A., Shimansky R.V., Khomutov V.N., Mikerin S.L., Spesivtsev E.V., Kutz, R.I. Increasing the spatial resolution of direct laser writing of diffractive structures on thin films of titanium group metals. *Proceedings of SPIE*, 2019, vol. 11030, pp. 110300A. <https://doi.org/10.1117/12.2520978>
48. Ponkratova E.Y., Kuzmichev A.M., Rud D.A., Khubezhov S.A., Dolgintsev D.M., Ageev E.I., Veiko V.P., Sinev D.A., Zuev D.A. Nanosecond Laser-Assisted Fabrication of photocatalytically active TiO₂ nanocoatings: Implication in organic dyes degradation. *ACS Applied Nano Materials*, 2024, vol. 7, no. 16, pp. 19268–19278. <https://doi.org/10.1021/acsnm.4c03155>
49. Kozlova E., Kotlyar V. Ultrashort laser pulse focusing by amplitude and phase zone plates. *Photonics*, 2022, vol. 9, no. 9, pp. 662. <https://doi.org/10.3390/photonics9090662>
50. Libenson M.N. Heating and destruction of thin films by quantum optical generator. *Fizika i himija obrabotki materialov*, 1968, no. 2, pp. 3–11. (in Russian)

Авторы

Пивоваров Артем Дмитриевич — студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0009-0006-7911-7085>, vvwwwv@bk.ru

Усынина Екатерина Викторовна — студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0009-0001-3642-2913>, kattyuus@gmail.com

Синев Дмитрий Андреевич — кандидат технических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, [sc 55547026700](https://orcid.org/0000-0002-6274-1491), Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-6274-1491>, sinev@itmo.ru

Authors

Artem D. Pivovarov — Student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0006-7911-7085>, vvwwwv@bk.ru

Ekaterina V. Usynina — Student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0001-3642-2913>, kattyuus@gmail.com

Dmitry A. Sinev — PhD, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 55547026700](https://orcid.org/0000-0002-6274-1491), <https://orcid.org/0000-0002-6274-1491>, sinev@itmo.ru

Статья поступила в редакцию 27.08.2024

Одобрена после рецензирования 17.12.2024

Принята к печати 23.01.2025

Received 27.08.2024

Approved after reviewing 17.12.2024

Accepted 23.01.2025



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»