

УДК 621.373.826

**А.В. Достовалов<sup>1,2</sup>, В.С. Терентьев<sup>2</sup>, К.А. Бронников<sup>2</sup>,  
Д.А. Белоусов<sup>2</sup>, В.П. Корольков<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

<sup>2</sup> Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, Новосибирск, Россия

## **ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ СКАНИРОВАНИЯ НА ФОРМИРОВАНИЕ ТЛИПСС РАДИАЛЬНО-СИММЕТРИЧНЫМ И ЭЛЛИПТИЧЕСКИМ ГАУССОВЫМ ФЕМТОСЕКУНДНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ПУЧКОМ**

Представлены результаты по исследованию формирования ТЛИППС при воздействии радиально-симметричного и астигматического гауссова пучка и различной скорости сканирования. Обнаружена линейная зависимость максимальной скорости сканирования от диаметра пучка при фиксированной частоте повторения импульсов в случае радиально-симметричного гауссова пучка. При воздействии астигматического гауссового пучка при сканировании с различной скоростью вдоль поверхности образца, как и в случае с радиально-симметричным гауссовым пучком, структура ТЛИППС зависит от скорости сканирования пучка. Количественный анализ однородности записанных структур проводился на основе сравнения значений параметра DLOA и величины нормированной площади дефектов структуры.

**Ключевые слова:** термохимические лазерно-индуцированные периодические поверхностные структуры, фемтосекундное лазерное наноструктурирование, астигматический гауссов пучок, скорость сканирования.

**A.V. Dostovalov<sup>1,2</sup>, V.S. Terentyev<sup>2</sup>, K.A. Bronnikov<sup>2</sup>,  
D.A. Belousov<sup>2</sup>, V.P. Korolkov<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

<sup>2</sup> Institute of Automation and Electrometry SB RAS,  
Novosibirsk, Russian Federation

## **INFLUENCE OF SCANNING SPEED ON TLIPSS FORMATION WITH AXIALLY SYMMETRIC AND ELLIPTICAL GAUSSIAN FS LASER BEAM**

The paper presents the results of studying the TLIPSS formation under the impact of a round shape and astigmatic Gaussian beam at different scanning speeds. A linear dependence of the maximum scanning speed on the beam diameter was found at a fixed pulse repetition rate in the case of a round shape Gaussian beam. In case of astigmatic Gaussian beam TLIPSS formation also depends on scanning speeds of the beam as in the case of a round shape Gaussian beam.

A quantitative analysis of the regularity of the obtained structures was carried out on the basis of a comparison of the values of the DLOA parameter and the magnitude of the normalized area of structure defects.

**Keywords:** thermochemical laser-induced periodic surface structures, femtosecond laser nanostructuring, elliptical Gaussian beam, scanning speed.

## **Введение**

Лазерно-индуцированные периодические поверхностные структуры (ЛИППС), которые формируются под действием лазерного излучения на поверхности металлов, полупроводников и диэлектриков, в последнее время являются предметом многочисленных исследований. Этот интерес обусловлен, с одной стороны, изучением физических процессов и механизмов, приводящих к формированию периодической структуры в фокальном пятне лазерного излучения. С другой стороны, данный эффект может применяться для практических целей создания необходимой топологии рельефа без использования дорогостоящей и многоэтапной технологии фотолитографии.

ЛИППС на поверхности металлов можно условно разделить на две категории: абляционные ЛИППС и термохимические ЛИППС (ТЛИППС). Структуры первого типа имеют ориентацию перпендикулярно направлению поляризации падающего излучения и образуются за счет механизма абляции материала с поверхности, приводящей к формированию рельефа ниже исходной поверхности металла. Данные структуры, как правило, характеризуются слабой упорядоченностью структуры, что проявляется в существенном разбросе в величине периодов и наличии фазовых сдвигов и дефектов. Структуры второго типа имеют ориентацию параллельно направлению поляризации падающего излучения и образуются за счет механизма окисления пленок металлов, приводящего к формированию выступов над уровнем исходной поверхности. Также структуры данного типа, в отличие от абляционных, имеют высокую степень упорядоченности (разброс значений периодов может быть менее 1 нм на площади в 1 мм<sup>2</sup>, а при определенных условиях фазовые сдвиги и дефекты структуры могут быть практически полностью устранены). По этой причине для практических применений термохимические структуры представляют наибольший интерес.

Первые экспериментальные результаты по формированию упорядоченных ТЛИППС в области фокусировки лазерного излучения были получены при воздействии на поверхность титановых металлических

пленок лазерного излучения (нс) [1] и (фс) [2, 3] длительности импульсов. Было установлено, что период данных структур  $\Lambda < \lambda$ , где  $\lambda$  – длина волны падающего лазерного излучения. Помимо Ti исследовалось образование данных структур на поверхности пленок Cr, Ni и NiCr под действием фс лазерных импульсов, и было установлено, что ТЛИППС-структуры не образуются на металлических пленках с высоким коэффициентом теплопроводности [4]. Также были исследованы оптические свойства данных структур и дифракционная эффективность решетки, записанной по данной технологии, в зависимости от поляризации падающего излучения [5]. Было также установлено, что химический состав оксида ТЛИППС зависит от толщины металлической пленки, с преобладанием концентрации оксида  $\text{CrO}_2$  в случае тонких пленок ( $<100$  нм) и  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  в случае толстых ( $<150$  нм), что также приводит к росту периода структур с увеличением толщины пленки.

Результаты в представленных выше работах были получены при малой скорости сканирования образца (8 мкм/с), что в совокупности с малым диаметром пучка ( $<10$  мкм) приводит к малой производительности процесса записи структур. Это, в свою очередь, ограничивает перспективы применения данной технологии на практике. В данной работе исследуется возможность увеличения производительности создания ТЛИППС, во-первых, за счет увеличения диаметра фокального пятна, во-вторых, за счет повышения скорости сканирования образца и определения максимально возможного значения скорости при заданных параметрах (диаметр фокального пятна и мощность излучения), а также за счет применения астигматического гауссова пучка, который имеет эллиптическую форму фокального пятна с соотношением сторон 1:10 и размером вдоль большой оси  $\approx 150$  мкм.

### **Экспериментальная часть**

При проведении экспериментов использовался фс-лазер PHAROS 6W с длиной волны 1026 нм, длительность импульса 230 фс, частота следования импульсов 200 кГц (рис. 1). Направление поляризации падающего излучения контролировалось поворотом пластинки  $\lambda/2$ . В экспериментах использовались две схемы фокусировки, первая из которых давала радиально-симметричный гауссов пучок, причем диаметр перетяжки варьировался от 15 до 42 мкм при изменении фокусного расстояния линзы  $L4$  от 35 до 100 мм. Вторая схема фокусировки

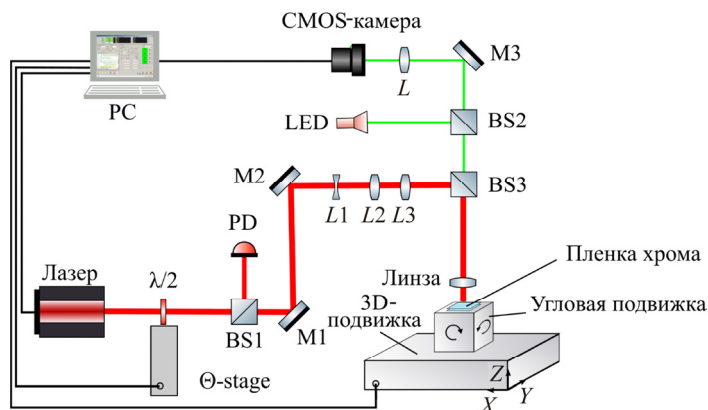


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

помимо линзы  $L4$  с фокусным расстоянием 50 мм также состояла из цилиндрических рассеивающих линз ( $L1$ ) с  $f_{L1} = -1$  м и собирающих линз с  $f_{L2} = 14$  мм ( $L2$ ),  $f_{L3} = 28$  мм ( $L3$ ). Линза  $L1$  преобразует гауссов симметричный пучок в астигматический, а линзы  $L2$  и  $L3$  задают размер пучка на входе фокусирующей линзы. Пленка хрома толщиной 30 нм напылялась на стеклянную подложку методом магнетронного напыления. В ходе проведения экспериментов были записаны структуры при перемещении образца с помощью 3D-позиционера Aerotech, со скоростью 1–150 мкм/с. Мощность излучения изменялась от 18 до 300 мВт в зависимости от диаметра пучка и схемы фокусировки. Направление поляризации падающего излучения совпадало с направлением сканирования образца. Сформированные структуры исследовались с помощью SEM и оптического микроскопов в режиме пропускания.

## Результаты

*Запись структур радиально-симметричным гауссовым пучком.* На рис. 2 представлены результаты по формированию ТЛИПСС при воздействии радиально-симметричного гауссова пучка ( $2\omega_0 = 15$  мкм) на пленку хрома при различной скорости сканирования вдоль поверхности образца. Как видно, период структур при увеличении скорости от 1 до 30 мкм не изменяется и составляет 680 нм (см. рис. 2, а, б). Поперечный размер области модификации при этом немного уменьшается, поскольку количество импульсов, приходящихся на единицу площади поверхности, с ростом скорости уменьшается,

что приводит к уменьшению суммарной энергии импульсов воздействующего излучения на единицу площади поверхности. При дальнейшем увеличении скорости сканирования до 40 мкм/с наблюдается формирование структур с фазовыми дефектами, из-за которых упорядоченность структуры нарушается и появляется заметный разброс в значениях периода (см. рис. 2, в).

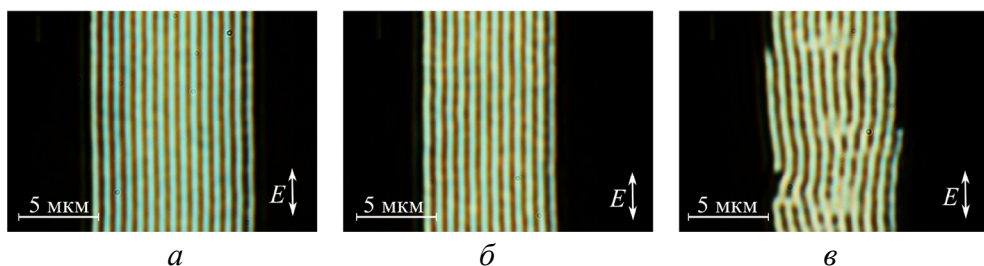


Рис. 2. Изображение ТЛИПСС, сформированных сфокусированным гауссовым пучком с диаметром 15 мкм при скорости сканирования 1 мкм/с (а), 30 мкм/с (б), 40 мкм/с (в) и мощности излучения 24 мВт

Схожая ситуация наблюдается при формировании ТЛИПСС при воздействии радиально-симметричного гауссова пучка с диаметром 21 мкм при различной скорости сканирования вдоль поверхности образца (рис. 3). В данном случае формирование упорядоченной периодической структуры наблюдается вплоть до значений скорости 50 мкм/с (см. рис. 3, б), однако при дальнейшем повышении скорости до 60 мкм/с (см. рис. 3, в) наблюдается формирование структур с фазовыми дефектами, из-за которых упорядоченность структуры нарушается. При увеличении диаметра гауссова пучка до 42 мкм нарушение упорядоченности структуры ТЛИПСС наблюдается при скорости свыше 100 мкм/с (рис. 4).

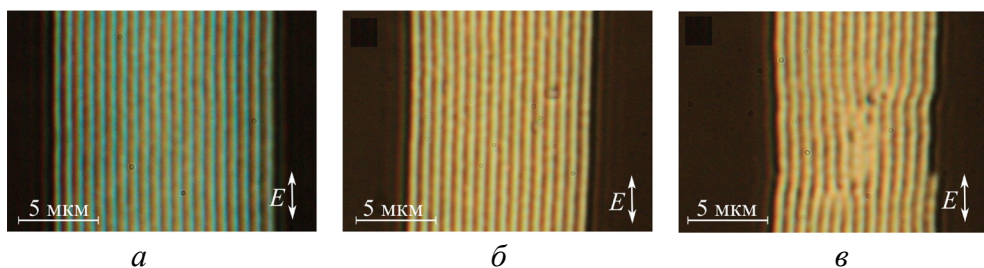


Рис. 3. Изображение ТЛИПСС, сформированных сфокусированным гауссовым пучком с диаметром 21 мкм при скорости сканирования 3,5 мкм/с (а), 50 мкм/с (б), 60 мкм/с (в) и мощности излучения 39 мВт

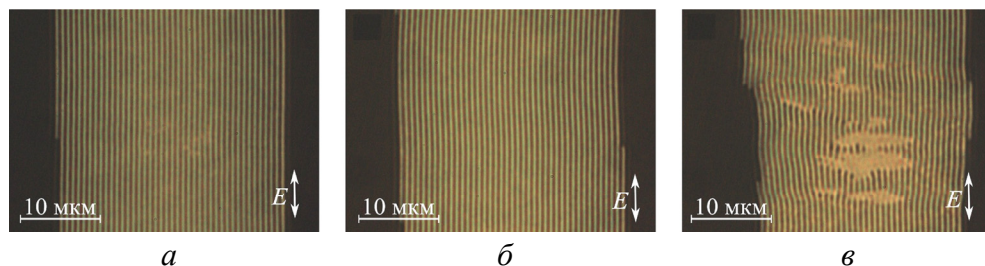


Рис. 4. Изображение ТЛИПС, сформированных сфокусированным гауссовым пучком с диаметром 42 мкм при скорости сканирования 5 мкм/с (а), 100 мкм/с (б), 150 мкм/с (в) и мощности излучения 150 мВт

Таким образом, наблюдается линейная зависимость величины максимальной скорости сканирования  $V_{\max}$ , при которой происходит формирование упорядоченной структуры ТЛИПС, от диаметра сфокусированного гауссова пучка (рис. 5, а). При этом было установлено, что величина максимальной скорости также зависит от мощности падающего лазерного излучения (рис. 5, б). Например, при размере пучка 15 мкм максимальная величина скорости для записи упорядоченных структур растет с 15 до 30 мкм/с при увеличении мощности излучения с 18 до 26 мВт. Такая же зависимость наблюдается и при больших размерах пучка, только в данном случае диапазон изменения величины существенно меньше. Например, при размере пучка 42 мкм величина максимальной скорости с изменением мощности излучения изменяется только на 10 %.

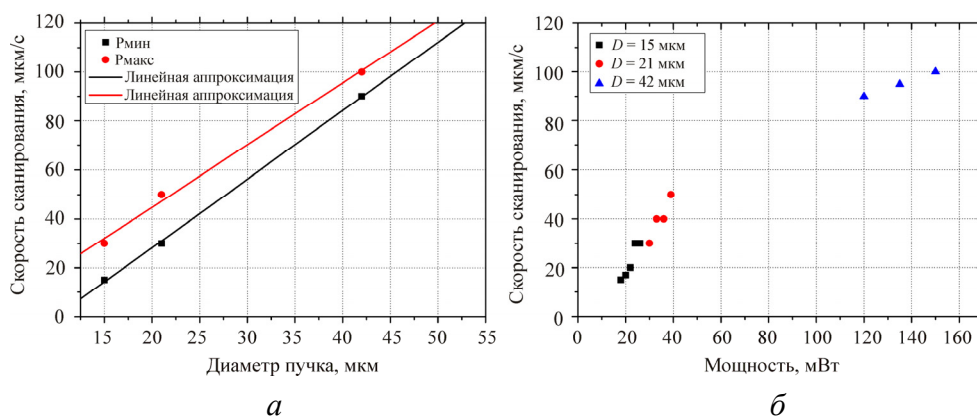


Рис. 5. Зависимость скорости сканирования от диаметра пучка (а) и мощности лазерного излучения (б)

Запись структур астигматическим пучком с различной скоростью. Как следует из предыдущего пункта статьи,  $V_{\max}$  для формирования упорядоченных структур линейно зависит от диаметра пучка  $2w_0$ . Таким образом, производительность записи  $\eta = V_{\max} \cdot 2w_0 \sim w_0^2$ . Для дальнейшего увеличения производительности записи структур с радиально-симметричным гауссовым пучком посредством увеличения диаметра пучка необходимо увеличивать мощность излучения также квадратичным образом, что на практике может быть затруднительным из-за ограничений на выходную мощность лазера и возможности оптического пробоя элементов, используемых в оптической схеме. Альтернативным решением данной проблемы является использование астигматического гауссова пучка, у которого диаметр пятна фокусировки увеличивается только вдоль одной из координат с помощью оптической схемы, описанной в экспериментальной части. Таким образом, площадь пучка растет линейно с увеличением диаметра астигматического пучка, что приводит к линейному росту мощности.

На рис. 6 представлено изображение ТЛИППС, сформированной с помощью астигматического гауссова пучка с диаметром вдоль большей оси, равным 150 мкм, без сканирования. Как видно, в данном случае размер области модификации  $\approx 100$  мкм, что дает  $\approx 150$  периодов структуры.

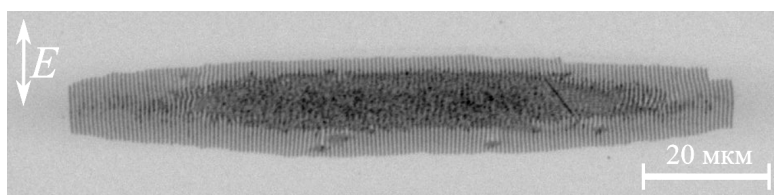


Рис. 6. СЭМ-изображение ТЛИППС, сформированной на пленке хрома при воздействии астигматического гауссова пучка мощностью 340 мВт

На рис. 7 представлено изображение ТЛИППС, сформированной с помощью астигматического гауссова пучка, при различных положениях образца по высоте относительно плоскости фокусировки линзы. Изображение, обозначенное  $z_f$ , соответствует плоскости фокусировки линзы. Изображения, обозначенные  $z = z_f + m\Delta z$  и  $z_f - m\Delta z$  ( $m = 1, 2, 3$ ), соответствуют положению образца дальше и ближе к положению

плоскости фокусировки линзы:  $z = z_f$ . При этом величина  $\Delta z = 200$  мкм. Помимо экспериментальных данных на рис. 7 также представлены расчетные данные профиля пучка для соответствующих положений образца. Моделирование параметров астигматического гауссова пучка было проведено методом матричной оптики в параксиальном приближении ( $ABCD$ -формализм) [6]. Геометрические и оптические параметры оптической системы (см. рис. 1) в плоскости рисунка ( $XZ$ ) и перпендикулярной плоскости ( $YZ$ ) рассчитывались отдельно, при этом отличие состояло в наличии или отсутствии цилиндрической линзы  $L1$ .

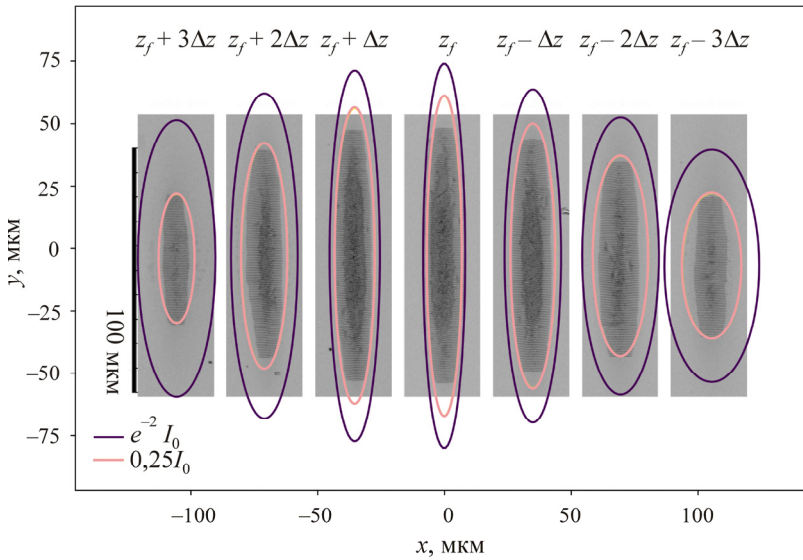


Рис. 7. СЭМ-изображения ТЛИПС-структур, сформированных при различных положениях пленки относительно плоскости фокусировки линзы (линии обозначают расчетные значения нормированной интенсивности (по уровню  $e^{-2}$  и  $0,25$ ))

Поперечное распределение интенсивности пучка на выходе из лазера представлялось в виде гауссова пучка с общим астигматизмом [7]:

$$E(x, y, z) = [q_x q_y]^{-1/2} \exp \left[ -ik \left( \frac{x^2}{2q_x} + \frac{y^2}{2q_y} + z \right) \right], \quad (1)$$

где  $q_j = i\pi w_{j0}^2 / \lambda + z$  ( $j = x, y$ ). В плоскости выходной апертуры лазера ( $z = 0$ ) параметры  $q_{x,y}$  полагались полностью мнимыми:  $q_j = i\pi w_{j0}^2 / \lambda$ , с разными  $w_{x0}$  и  $w_{y0}$  (которые брались из технической документации



к лазеру). С помощью матриц передачи вычислялось преобразование параметров гауссова пучка из плоскости выходной апертуры лазера в объектную плоскость:  $q_j^{obj} = (q_j A + B) / (q_j C + D)$ , где  $A, B, C, D$  – элементы матрицы передачи. На рис. 7 показывается расчетное распределение интенсивностей  $I(x, y, z) = |E(x, y, z)|^2$  в виде контурных изолиний для разных  $z$  и смещенных по латеральным координатам в соответствии с фотографиями ТЛИППС-структур. При этом максимальное значение интенсивности  $I_0 = I(0, 0, z_f)$ , где  $z_f = f_{L4} + 4,65$  мм. Изолинии построены для уровня  $e^{-2}$  и 0,25 от  $I_0$ . Как видно из расчетов, размер пучка 150 мкм вдоль большой оси эллипса достаточно точно описывает экспериментальные данные. Более того, эти эксперименты показывают необходимую точность позиционирования относительно плоскости фокусировки линзы ( $\pm 200$  мкм).

Также были проведены эксперименты по записи ТЛИППС при сканировании с различной скоростью вдоль поверхности образца астигматическим гауссовым пучком и  $P = 240$  мВт (рис. 8). Как видно, структура ТЛИППС зависит от скорости сканирования пучка: формирование упорядоченной структуры при скорости сканирования 100 мкм/с (см. рис. 8, а), появление некоторых дефектов наблюдается при увеличении скорости до 300 мкм/с (см. рис. 8, б) и рост количества дефектов при дальнейшем увеличении скорости сканирования до 1000 и 2000 мкм/с (см. рис. 8, в, г). Однако во всех представленных случаях структура остается упорядоченной и не наблюдается фазовых сдвигов, которые были обнаружены при записи ТЛИППС при воздействии радиально-симметричного гауссова пучка и высокой скорости сканирования.

Для количественного анализа однородности структур сформированных ТЛИППС в зависимости от скорости сканирования использовался параметр DLOA (dispersion in the LIPSS orientation angle)  $\Delta\theta$  [8], который характеризует дисперсию угла ориентации решетки и сопоставим с параметром углового размытия при двумерном преобразовании Фурье полученных СЭМ-изображений. Для определения DLOA использовался свободно доступный плагин OrientationJ [9], разработанный для программного обеспечения с открытым исходным кодом ImageJ [10], который на основе тензорного анализа [11] позволяет определить угловую ориентацию каждого пикселя обрабатываемого изображения. Последующая селекция пикселей, имеющих ту или иную ориентацию с шагом дискретизации по углу, который в нашем случае

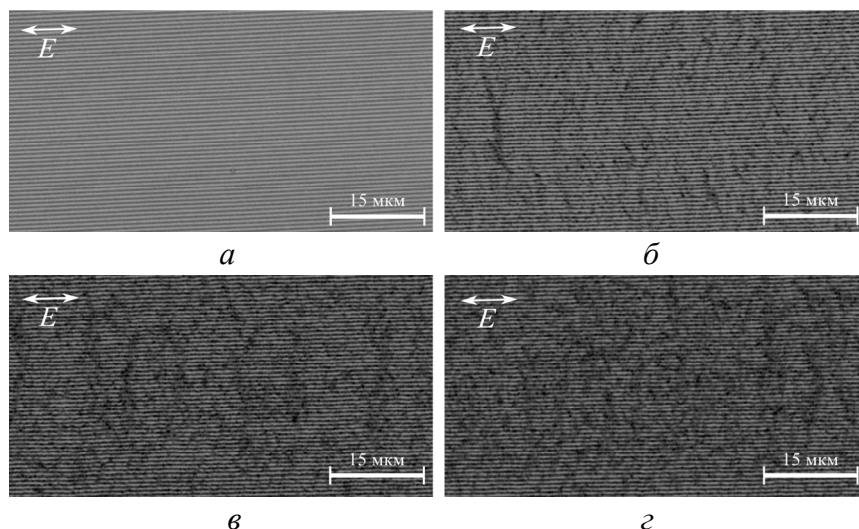


Рис. 8. СЭМ-изображения ТЛИПС, сформированных астигматическим гауссовым пучком при сканировании с различной скоростью вдоль поверхности образца: 100 мкм/с (а), 300 мкм/с (б), 1000 мкм/с (в), 2000 мкм/с (г)

составлял  $1^\circ$ , позволяет построить график углового распределения (УР), полуширина на полувысоте которого и определяет параметр  $\Delta\theta$  (рис. 9). Результаты определения параметра  $\Delta\theta$ , полученные при обработке СЭМ-изображений ТЛИПС, записанных с разной скоростью сканирования, представлены в таблице.

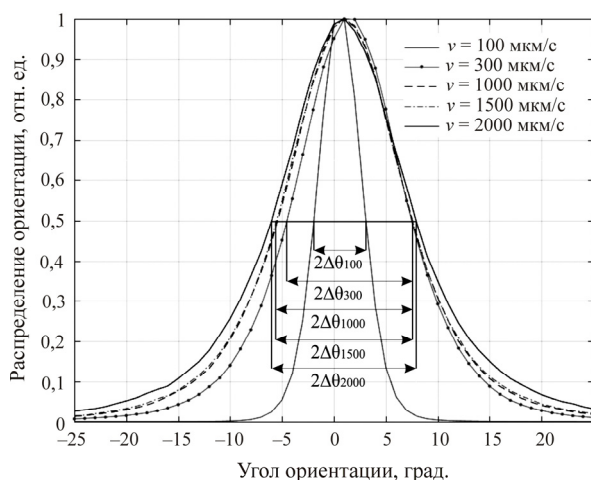


Рис. 9. Нормированные фрагменты графиков углового распределения, полученные при обработке СЭМ-изображений структур ТЛИПС, записанных с разной скоростью сканирования

Результаты обработки СЭМ-изображений структур ТЛИППС, записанных с различной скоростью сканирования астигматическим гауссовым пучком и мощности 240 Вт

Скорость записи, мкм/с	DLOA ( $\Delta\theta$ ), град.	НПУР, отн. ед.	Площадь дефектов, %
100	2	0,031	1,31
300	5,5	0,078	8,71
1000	6	0,086	19,49
1500	6	0,087	20,25
2000	7	0,098	27,46

Однако параметр  $\Delta\theta$  при анализе ТЛИППС, записанных при скоростях сканирования от 300 до 2000 мкм/с, изменяется незначительно, в пределах выбранного шага дискретизации по углу ориентации. Это не позволяет использовать данный параметр для однозначного утверждения о зависимости качества полученных структур от скорости сканирования. В связи с этим при обработке каждого изображения вместе с параметром  $\Delta\theta$  мы также рассчитываем площадь под кривой нормированного графика углового распределения и делим полученное значение на количество дискрет по угловой ориентации, по которым производилась селекция пикселей (в нашем случае 180). Увеличение параметра нормированной площади под кривой графика углового распределения (НПУР) показывает, что большее количество пикселей обрабатываемого изображения (в процентном соотношении) имеет значение угловой ориентации, не совпадающее с основным направлением структуры ТЛИППС, которое соответствует положению пика графика УР. Как видно из таблицы, данный параметр более наглядно характеризует зависимость однородности полученных структур от скорости сканирования по сравнению со значением  $\Delta\theta$ , при этом полученные результаты обработки по обоим этим параметрам хорошо согласуются между собой.

Кроме карты углового распределения пикселей («Orientation») обрабатываемого изображения используемый плагин OrientationJ позволяет получать карту когерентности пикселей («Coherency»). Когерентность может принимать значения от 0 до 1 и указывает на степень сонаправленности каждого пикселя с теми пикселями, которые его окружают. Использование полученных карт когерентности и угловой

ориентации позволяет выделить дефектные (неоднородные) области обрабатываемого изображения структур ТЛИППС (см. рис. 7). Зависимость площади дефектов структур сформированных ТЛИППС от скорости сканирования представлена в таблице.

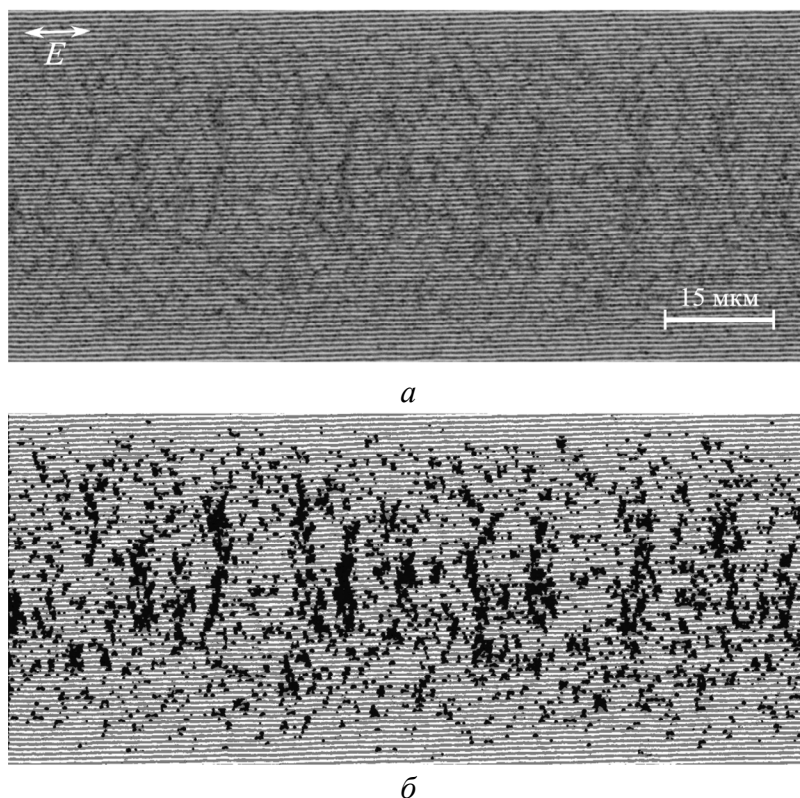


Рис. 10. Определение дефектных (неоднородных) областей СЭМ-изображения структуры ТЛИППС, записанной при скорости сканирования 1000 мкм/с:  
а – исходное СЭМ изображение; б – обработанное изображение после фильтрации дефектных областей

Результаты обработки СЭМ-изображений структур ТЛИППС, сформированных при разной скорости сканирования, и оценка по всем вышеописанным критериям показывают, что при минимальной скорости записи, которая составляла 100 мкм/с, была получена наиболее однородная структура ТЛИППС. Увеличение скорости записи приводит к ухудшению прямолинейности и к увеличению площади дефектных областей на сформированных структурах. При этом между структурами, полученными при скоростях записи 1000 мкм/с и 1500 мкм/с, су-

ущественных различий выявлено не было, однако дальнейшее увеличение скорости записи до 2000 мкм/с привело к дальнейшему ухудшению параметров сформированной структуры ТЛИППС.

### **Выводы**

В результате работы исследовано формирование ТЛИППС при воздействии радиально-симметричного гауссова пучка и различной скорости сканирования. Обнаружена линейная зависимость максимальной скорости сканирования, при которой формируются упорядоченные структуры, от диаметра пучка при фиксированной частоте повторения импульсов. При фиксированном диаметре пучка данная максимальная скорость сканирования зависит от мощности излучения, при этом диапазон изменения данной величины существенно зависит от диаметра пучка, достигая 50 % в случае пучка диаметром 15 мкм и падая до 10 % в случае пучка диаметром 42 мкм.

Для количественного анализа однородности записанных структур использовались предложенный ранее параметр DLOA и введенные нами параметры НПУР и величина нормированной площади дефектов. Полученные результаты показали, что при обработке СЭМ-изображений, параметр НПУР более наглядно характеризует упорядоченность полученных структур ТЛИППС по сравнению с параметром DLOA, так как при его определении учитывается вся форма полученного графика углового распределения пикселей, а не только его полуширина на полувысоте. При воздействии астигматического гауссова пучка, как и в случае с радиально-симметричным гауссовым пучком, возможность записи ТЛИППС с высокой степенью упорядоченности зависит от скорости сканирования пучка. Практически бездефектная структура формируется только до скорости сканирования  $\approx 100$  мкм/с. Площадь дефектов растет с 1,3 до 20–27 % при дальнейшем увеличении скорости сканирования до 1000 и 2000 мкм/с. Однако во всех представленных случаях структура остается упорядоченной, и не наблюдается фазовых сдвигов.

Предложенная схема записи ТЛИППС с помощью астигматического гауссова пучка существенно увеличивает производительность записи, что открывает возможности по практическому применению технологии записи периодических структур.

### **Благодарности**

*Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 16-32-60096). Работа Д.А. Белоусова и В.П. Королькова выполнена за счет средств субсидии на финансовое обеспечение выполнения государственного задания (№ гос. регистрации АААА-А17-117052210002-7) в Институте автоматики и электрометрии СО РАН.*

### **Список литературы**

1. Polarization-dependent single-beam laser-induced grating-like effects on titanium films / S. Camacho-López, R. Evans, L. Escobar-Alarcón, M.A. Camacho-López, M.A. Camacho-López // Appl. Surf. Sci. – 2008. – 255. – 3028–3032.
2. Nonlinear laser lithography for indefinitely large-area nanostructuring with femtosecond pulses / B. Öktem, I. Pavlov, S. Ilday, H. Kalaycıoğlu, A. Rybak, S. Yavaş, M. Erdoğan, F.Ö. Ilday // Nat. Photonics. – 2013. – 7. – 897–901.
3. Dostovalov A.V., Korolkov V.P., Babin S.A. Simultaneous formation of ablative and thermochemical laser-induced periodic surface structures on Ti film at femtosecond irradiation // Laser Phys. Lett. – 2015. – 12. – 036101.
4. Study of the formation of thermochemical laser-induced periodic surface structures on Cr, Ti, Ni and NiCr films under femtosecond irradiation / A.V. Dostovalov, V.P. Korolkov, V.S. Terentyev, K.A. Okotrub, F.N. Dultsev, S.A. Babin // Quantum Electron. – 2017. – 47.
5. Dostovalov A.V., Korolkov V.P., Babin S.A. Formation of thermochemical laser-induced periodic surface structures on Ti films by a femtosecond IR Gaussian beam: regimes, limiting factors, and optical properties // Appl. Phys. – 2017. – B 123. – 30.
6. Kogelnik H., Li T. Laser Beams and Resonators // Appl. Opt. – 1966. – 5. – 1550.
7. Arnaud J.A., Kogelnik H. Gaussian Light Beams with General Astigmatism // Appl. Opt. – 1969. – 8. – 1687.
8. High-speed manufacturing of highly regular femtosecond laser-induced periodic surface structures: physical origin of regularity / I. Gnilit-skyi, T.J.-Y. Derrien, Y. Levy, N.M. Bulgakova, T. Mocek, L. Orazi // Sci. Rep. – 2017. – 7. – 8485.

9. Transforms and operators for directional bioimage analysis: A survey / Z. Piispoki, M. Storath, D. Sage, M. Unser // *Focus on Bio-Image Informatics* (Springer International Publishing). – 2016. – Vol. 219. – P. 69–93.

10. The ImageJ ecosystem: An open platform for biomedical image analysis / I. Schindelin, C.T. Rueden, M.C. Hiner, K.W. Eliceiri // *Molecular Reproduction and Development*. – 2015. – Vol. 82. – P. 518–529.

11. Experimental Investigation of Collagen Waviness and Orientation in the Arterial Adventitia Using Confocal Laser Scanning Microscopy / R. Rezakhaniha, A. Agianniotis, J.T.C. Schrauwen, A. Griffa, D. Sage, C.V.C. Bouten, F.N. van de Vosse, M. Unser, N. Stergiopulos // *Biomechanics and Modeling in Mechanobiology*. – 2012. – Vol. 11. – № 3–4. – P. 461–473.

### References

1. Camacho-López S., Evans R., Escobar-Alarcón L., Camacho-López M.A., Camacho-López M. A. Polarization-dependent single-beam laser-induced grating-like effects on titanium films. *Appl. Surf. Sci.*, 2008, 255, pp. 3028–3032.

2. Öktem B., Pavlov I., Ilday S., Kalaycıoğlu H., Rybak A., Yavaş S., Erdoğan M., Ilday F.Ö. Nonlinear laser lithography for indefinitely large-area nanostructuring with femtosecond pulses. *Nat. Photonics*, 2013, 7, pp. 897–901.

3. Dostovalov A.V., Korolkov V.P., Babin S.A. Simultaneous formation of ablative and thermochemical laser-induced periodic surface structures on Ti film at femtosecond irradiation. *Laser Phys. Lett.*, 2015, 12, 036101.

4. Dostovalov A.V., Korolkov V.P., Terentyev V.S., Okotrub K.A., Dultsev F.N., Babin S.A. Study of the formation of thermochemical laser-induced periodic surface structures on Cr, Ti, Ni and NiCr films under femtosecond irradiation. *Quantum Electron.*, 2017, 47.

5. Dostovalov A.V., Korolkov V.P., Babin S.A. Formation of thermochemical laser-induced periodic surface structures on Ti films by a femtosecond IR Gaussian beam: regimes, limiting factors, and optical properties. *Appl. Phys.*, 2017, B 123, 30.

6. Kogelnik H., Li T. Laser beams and resonators. *Appl. Opt.*, 1966, 5, 1550.

7. Arnaud J.A., Kogelnik H. Gaussian light beams with general astigmatism. *Appl. Opt.*, 1969, 8, 1687.

8. 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. *Sci. Rep.*, 2017, 7, 8485.

9. Piispoki Z., Storath M., Sage D., Unser M. Transforms and operators for directional bioimage analysis: A survey. *Focus on Bio-Image Informatics (Springer International Publishing)*, 2016, vol. 219, pp. 69-93.

10. Schindelin I., Rueden C.T., Hiner M.C., Eliceiri K.W. The ImageJ ecosystem: An open platform for biomedical image analysis. *Molecular Reproduction and Development*, 2015, vol. 82, pp. 518-529.

11. Rezakhanliha R., Agianniotis A., Schrauwen J.T.C., Griffa A., Sage D., Bouten C.V.C., van de Vosse F.N., Unser M., Stergiopulos N. Experimental investigation of collagen waviness and orientation in the arterial adventitia using confocal laser scanning microscopy. *Biomechanics and Modeling in Mechanobiology*, 2012, vol. 11, no., 3-4, pp. 461-473.

Получено 15.09.2018