

Метод обработки микроизображений для анализа структур ТЛИППС

Д.А. Белоусов¹, А.В. Достовалов^{1,2}, В.П. Корольков¹, С.Л. Микерин¹

¹Институт автоматизации и электрометрии СО РАН,
630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, д. 1,
²Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, д. 1

Аннотация

В работе описан метод обработки микроизображений лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур для количественной оценки их упорядоченности и дефектности. Приведены результаты его применения для анализа микроизображений периодических структур, сформированных на плёнках хрома толщиной 30 нм астигматически сфокусированным Гауссовым пучком фемтосекундного лазера. Получены зависимости относительной площади модифицированной этим пучком области, площади дефектов, а также упорядоченности периодических структур от скорости сканирования и мощности записывающего пучка.

Ключевые слова: цифровая обработка изображений, микроскопия, лазерная обработка материалов, лазерно-индуцированные периодические поверхностные структуры.

Цитирование: Белоусов, Д.А. Метод обработки микроизображений для анализа структур ТЛИППС / Д.А. Белоусов, А.В. Достовалов, В.П. Корольков, С.Л. Микерин // Компьютерная оптика. – 2019. – Т. 43, № 6. – С. 936-945. – DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-6-936-945.

Введение

Лазерно-индуцированные периодические поверхностные структуры (ЛИППС), формирование которых осуществляется за счёт воздействия импульсного лазерного излучения на поверхность различных металлов, полупроводников и диэлектриков, в настоящее время являются предметом многочисленных исследований [1–6]. С одной стороны, это связано с необходимостью изучения физических процессов и механизмов, которые приводят к формированию периодической структуры на поверхности обрабатываемого лазерным излучением материала. С другой стороны, ЛИППС могут быть использованы для решения практических задач по микро- и наноструктурированию поверхностей без применения дорогостоящих литографических методов.

ЛИППС на поверхности металлов можно условно разделить на две категории: абляционные ЛИППС [7] и термохимические ЛИППС (ТЛИППС). Первый тип структур, как следует из названия, образуется в результате процесса абляции материала с обрабатываемой поверхности, в результате чего микрорельеф ЛИППС формируется ниже начального уровня поверхности металла. При этом ориентация структур абляционных ЛИППС направлена перпендикулярно относительно направления поляризации записывающего пучка. Для данного типа структур, как правило, свойственна слабая упорядоченность, что проявляется в существенном разбросе периодов структуры, наличии фазовых сдвигов и дефектов. В основе формирования микрорельефа второго типа ЛИППС лежит механизм окисления металлической плёнки, что приводит к образованию выступов над исходным уровнем обрабатываемой поверхности. Ориентация структур сонаправлена в данном случае с направлением поляризации записывающего пучка. В отличие

от абляционных ЛИППС, для ТЛИППС характерна высокая степень упорядоченности структур (разброс значений сформированных периодов на площади в 1 мм² может быть менее 1 нм, а при определенных условиях фазовые сдвиги и дефекты структуры могут быть практически полностью устранены [2]), в связи с чем они имеют большой потенциал для практического применения [8, 9].

При решении реальных практических задач важными параметрами являются качество микрорельефа и время его формирования. Повышения производительности записи можно добиться, увеличив размер записывающего пучка, изменяя его форму и мощность, а также увеличивая скорость сканирования образца [10]. Однако изменение этих параметров приводит к изменению условий экспонирования поверхности металлической плёнки, что влияет на характеристики сформированных структур ТЛИППС. В связи с этим важной задачей является определение оптимальных параметров записи, позволяющих установить баланс между производительностью записи и качеством сформированного микрорельефа, удовлетворяющего требованиям конкретной задачи. Данная работа посвящена методу обработки микроизображений периодических структур, который предназначен для исследования структур ТЛИППС, записанных при различных параметрах.

1. Объект исследования

ТЛИППС, исследуемые в данной работе, были сформированы на поверхности пленок хрома (толщина 30 нм, материал подложки – ВК7) на установке прецизионной фемтосекундной модификации материалов, использующей излучение фемтосекундного лазера Light Conversion PHAROS 6W (длина волны – 1026 нм, частота повторения импульсов в экспериментах – 200 кГц, длительность импульса на полувы-

соте – 232 фс). Для увеличения производительности записи формирование ТЛИППС производилось с помощью астигматического Гауссова пучка, имеющего эллиптическую форму фокального пятна с соотношением сторон $1 \div 10$ и размером вдоль большой оси ≈ 150 мкм [10]. Мощность записывающего пучка изменялась в диапазоне 250–340 мВт. Скорость сканирования в экспериментах составила 100–2000 мкм/с. Исследование полученных структур производилось по анализу микроизображений, полученных на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) Hitachi TM3000 с увеличением $1200\times$ (рис. 1 – здесь и далее в работе приводимые оригиналы СЭМ-изображений подвержены дополнительной обработке по повышению контраста и яркости для лучшего визуального восприятия).

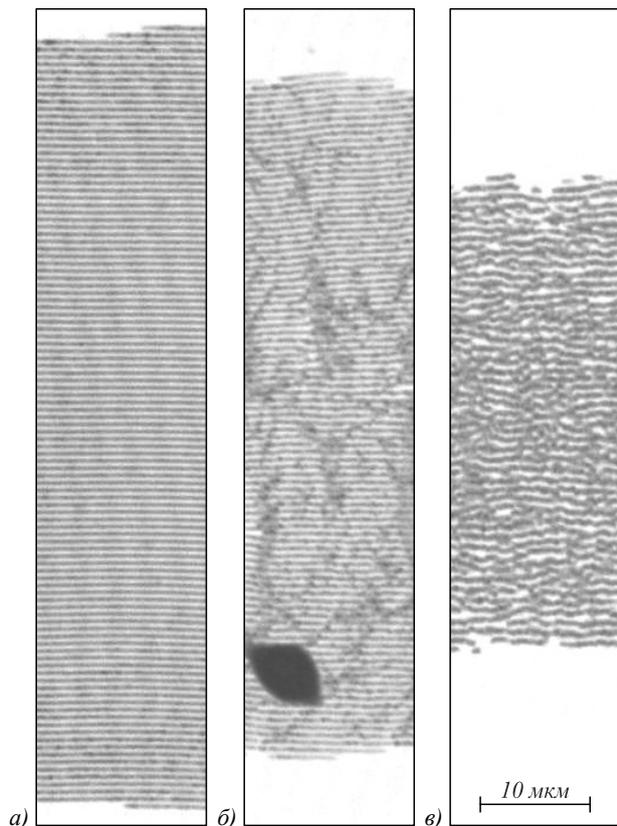


Рис. 1. Фрагменты СЭМ-изображений ТЛИППС, записанных при мощности пучка 275 мВт и скорости сканирования 100 мкм/с (а), 150 мкм/с (б) и 500 мкм/с (в)

2. Метод анализа микроизображений

Определение упорядоченности ТЛИППС

В основе предлагаемого метода обработки микроизображений лежит подход, описанный в работе [5], в котором с помощью тензорного анализа обрабатываемого изображения [11, 12] определяется угловая ориентация, приписываемая каждому пикселю. Для анализа упорядоченности структуры строится угловое распределение пикселей и вычисляется его дисперсия (параметр DLOA, *dispersion in the LIPSS orientation angle*). В работе [5] показано, что DLOA соответствует и сопоставим по величине с параметром

углового размытия, получаемого при преобразовании Фурье обрабатываемого изображения, по которому также может быть оценена упорядоченность структуры.

Для определения параметра DLOA авторы работы [5] предлагают использовать свободно доступный плагин OrientationJ [13], разработанный для программного обеспечения с открытым исходным кодом ImageJ [14], который позволяет строить карту угловой ориентации пикселей обрабатываемого изображения (вкладка «Orientation»). Последующим суммированием числа пикселей, угловая ориентация которых попадает в заданный интервал с выбранным шагом дискретизации по углу ($\Delta\alpha$), строится график углового распределения (УР), полуширина на полувысоте которого и определяет величину DLOA ($\Delta\theta$ на рис. 2). Уменьшение шага дискретизации по углу ориентации позволяет более точно определять параметр DLOA. В своей работе мы выбирали шаг дискретизации по углу в диапазоне от $0,1^\circ$ до 1° , начиная с большего значения, из условия сходимости результатов при определении величины $\Delta\theta$. Значение параметра DLOA для выбранной величины $\Delta\alpha$ лежит в диапазоне $\Delta\theta(\Delta\alpha) \pm \Delta\alpha$. При уменьшении $\Delta\alpha$ значение параметра DLOA не должно выходить за рамки диапазона, полученного при большем значении $\Delta\alpha$. Если данное условие не выполняется, то дальнейшее уменьшение шага дискретизации не осуществляется.

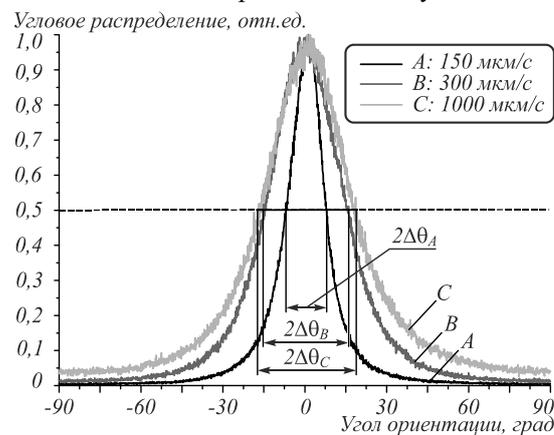


Рис. 2. Определение параметра DLOA по графикам УР для ТЛИППС, записанных при мощности пучка 320 мВт и различной скоростью сканирования

Если сформированные дорожки ТЛИППС строго прямолинейны, то значение $\Delta\theta$ равно нулю. Увеличение же данного параметра свидетельствует об ухудшении прямолинейности структур. Однако параметр DLOA не даёт полной информации о прямолинейности, а главное, о параллельности сформированных структур, так как полуширина на полувысоте никак не характеризует основание графика углового распределения. При наличии дефектов и при ухудшении упорядоченности структуры большая часть пикселей может иметь угловую ориентацию, не соответствующую основному направлению структуры, однако если их количество для того или иного угла ориентации не превышает 50% от суммы пикселей, имеющих ос-

новную ориентацию, которая соответствует пику на графике УР, это никак не отразится при определении параметра DLOA.

В связи с этим из полученного графика УР предлагается рассчитывать не только значение $\Delta\theta$, но и нормированную площадь под кривой графика УР (НПУР), которая определяется как отношение суммы всех значений, формирующих нормированный график УР, к количеству отсчётов по угловой ориентации $\Delta\alpha$, используемых для построения этого графика (рис. 3). Увеличение параметра НПУР показывает, что большее количество пикселей обрабатываемого изображения (в процентном соотношении) имеет значение угловой ориентации, не совпадающее с основным направлением структуры. Параметр НПУР совместно с параметром DLOA позволяют оценить упорядоченность периодических структур на обрабатываемом микроизображении.

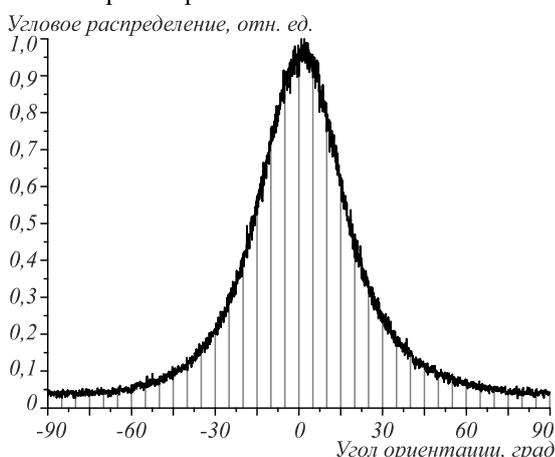


Рис. 3. Определение параметра НПУР по графику УР для ТЛИППС, записанной при мощности пучка 320 мВт и скорости сканирования 1000 мкм/с

Определение относительной площади модифицированной области и площади дефектов

Относительная площадь модифицированной записывающим лазерным пучком области (ОПМО) и площадь дефектов структуры (локальных неоднородностей сформированной ТЛИППС) на обрабатываемых микроизображениях являются важными параметрами, так как характеризуют производительность и качество записи ТЛИППС. В зависимости от скорости сканирования в процессе записи меняются параметры экспонирования материала, на поверхности которого происходит формирование периодической структуры. В связи с этим для выбранной мощности записывающего пучка при увеличении скорости сканирования происходит уменьшение площади модифицированной области. Кроме того, изменение параметров экспонирования приводит к возникновению различного рода дефектов и уменьшению упорядоченности в локальных областях на периодической структуре.

При обработке микроизображений описанным выше методом вклад в график УР вносят все пиксели обрабатываемого изображения. Так как ТЛИППС по краям не имеет прямой границы и при уменьшении

экспонирования образца эта граница всё больше размывается (рис. 4а), при анализе на микроизображении присутствует область, не обработанная лазерным излучением, которая вносит погрешность в определение параметров DLOA и НПУР. Эту проблему можно решить, обрезав обрабатываемое изображение, оставив для анализа только периодическую структуру. Однако этот подход имеет существенный недостаток. При анализе структур, образованных при слабом экспонировании материала, чтобы сформировать изображение прямоугольной формы, включающее в себя только область с периодической структурой, придётся обрезать значительную часть исследуемой структуры. Это, в свою очередь, приводит к двум проблемам. Во-первых, при анализе обрезанного микроизображения будет некорректно определен параметр ОПМО. Во-вторых, при уменьшении параметров экспонирования, приводящих к размытию границы сформированных ТЛИППС, уменьшается и площадь сформированной структуры, и дополнительное обрезание обрабатываемого микроизображения приведёт к дополнительной потере пикселей, что чревато малой выборкой для построения графика УР.

Кроме того, при изучении физических процессов и механизмов, приводящих к формированию периодической ТЛИППС, анализируются не только структуры, записанные при сканировании записывающего пучка, но и структуры, сформированные при статичной обработке материала записывающим пучком с различными параметрами, такими как время обработки, частота импульсов, мощность пучка и т.д. В случае обработки неподвижным астигматическим Гауссовым пучком структура будет иметь форму, близкую к эллипсу. При этом из-за переэкспонирования в центральной области площадь периодической структуры на обрабатываемом изображении может составлять меньше 40%. Фрагмент такой структуры представлен на рис. 4б.

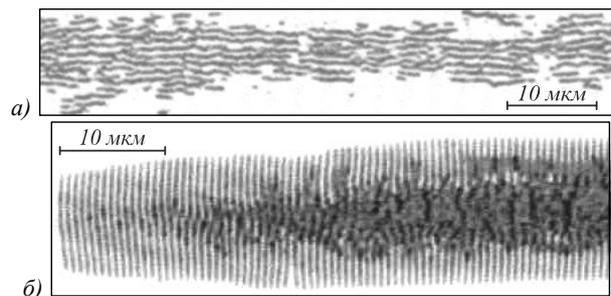


Рис. 4. Фрагменты СЭМ-изображений ТЛИППС: мощность пучка – 250 мВт и скорость сканирования – 500 мкм/с (а); ТЛИППС, сформированная при воздействии неподвижным астигматическим Гауссовым пучком мощностью 300 мВт в течение одной секунды (б)

В связи с этим при анализе изображений ТЛИППС можно выделить две задачи. Во-первых, выделение на изображении области, обработанной лазерным излучением с последующим определением по графикам УР, построенным без учёта пикселей в необработанной области параметров $DLOA_{ТЛИППС}$ и $НПУР_{ТЛИППС}$. Во-вторых, определение площади дефектов и определение параметров $DLOA_{эфф.обл}$ и $НПУР_{эфф.обл}$ в эф-

фективно записанной области, т.е. по графикам УР, построенным без учёта пикселей в необработанной и дефектных областях.

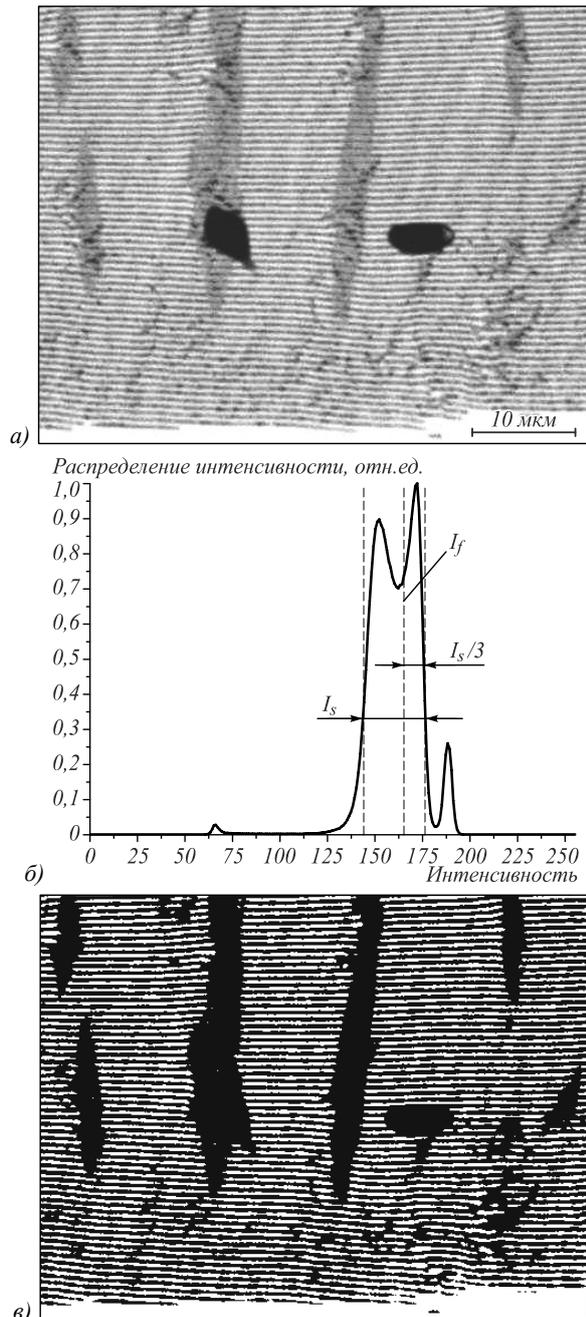


Рис. 5. Выделение светлых полос ТЛИППС, записанной при мощности пучка 300 мВт и скорости сканирования 125 мкм/с: фрагмент исходного изображения (а); график распределения интенсивности (б); фрагмент изображения после выделения светлых полос (в)

Для определения необработанных и дефектных областей воспользуемся тем, что объектом исследования является периодическая структура, следовательно, большую часть на обрабатываемом микроизображении составляют светлые и тёмные полосы (рис. 5а). На рис. 5а видно, что часть дефектов (ярко выраженные тёмные области) можно выделить по их интенсивности, однако также видно, что большая

часть дефектов лежит в диапазоне интенсивностей тёмных и светлых полос ТЛИППС. На изображениях ТЛИППС, представленных на рис. 1а, рис. 1в и рис. 4а, б, ярко выраженные тёмные области отсутствуют, и все дефекты лежат в диапазоне интенсивностей тёмных и светлых полос периодической структуры, что является типичным для ТЛИППС. Помимо этого, интенсивность светлых полос очень близка к интенсивности в областях микроизображения, в которых отсутствует периодическая структура. Это связано с тем, что рядом со структурой ТЛИППС поверхность металла покрывается оксидной плёнкой, что приводит к выравниванию интенсивностей между светлыми полосами и окружающей ТЛИППС областью на СЭМ-изображениях. Так что выделить интересующую нас область ТЛИППС исключительно по селекции пикселей по интенсивности не представляется возможным.

Для решения этой проблемы выделим на обрабатываемом микроизображении светлые полосы структуры ТЛИППС, определив ширину диапазона интенсивностей I_s , в котором сосредоточена основная часть исследуемой структуры (рис. 5б). Так как при определении угловой ориентации пикселей в программе ImageJ скважность структур не влияет на определение данного параметра, необязательно точно определять границу тёмных и светлых полос периодической структуры. В связи с этим устанавливаем значение фильтра по интенсивности I_f , отстоящее от правой границы интервала I_s на величину $I_s/3$, как показано на рис. 5б, для того, чтобы выделить направления светлых и тёмных полос. Далее осуществляем выделение светлых полос периодической структуры, при этом всем пикселям, интенсивность которых выше или равна значению I_f , присваивается значение, равное 255, а тем пикселям, интенсивность которых меньше значения I_f , присваивается значение 10. Пикселям, которые уже были определены как дефектные, по графику распределения интенсивностей (ярко выраженные тёмные области) присваиваем значение 0. В итоге получаем изображение, в котором тёмные и светлые полосы имеют отчётливый контраст, а в областях дефектов отсутствуют светлые полосы (рис. 5в). Далее обрабатываем оба изображения (исходное и изображение с выделенными светлыми полосами периодической структуры) в программе ImageJ и сохраняем две карты углового распределения пикселей обрабатываемых изображений, из которых строим графики УР, как описано в предыдущем пункте (рис. 6а). Помимо карт УР, в программе ImageJ сохраняем также карты угловой когерентности (УК) пикселей обрабатываемых изображений (вкладка «Coherency»). УК может принимать значения в диапазоне от 0 до 1, где 1 соответствует высоко ориентированным структурам на обрабатываемом микроизображении. Так же, как и для карт УР, по сохранённым картам УК производится суммирование числа пикселей, имеющих УК, попадающую в заданный интервал, с шагом дискретизации 0,01 (рис. 6б).

Использование полученных карт УР и УК позволяет выделить дефектные области, а также области, не обработанные лазерным излучением (неэффективные области обрабатываемого изображения). Для этого на графике УР определяются границы «купола», который характеризует угловой диапазон ориентации пикселей микроизображения, формирующих ТЛИППС. В своей работе для определения границ «купола» мы использовали фильтр, установленный на уровне 1% от разности максимального и минимального значения УР (рис. 6а). Все пиксели, угловая ориентация которых не соответствует основному диапазону УР структур ТЛИППС, характеризуют неэффективную область на изображении. Кроме того, если УК пикселя хоть на одной из двух карт УК меньше значения 0,5, т.е. пиксель не относится к высоко ориентированной области, то этот пиксель также характеризует неэффективную область на микроизображении (рис. 6б).

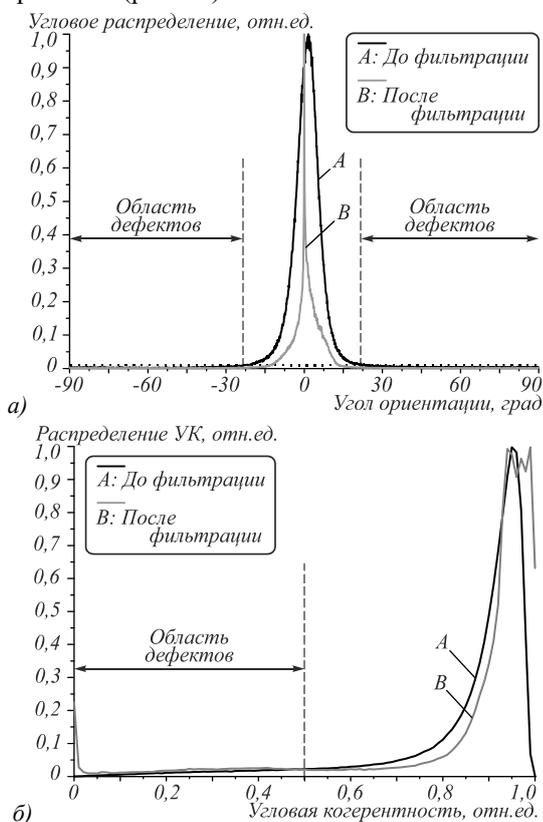


Рис. 6. Графики УР (а) и УК (б), полученные при анализе изображения до и после фильтрации по интенсивности

Помимо уже выделенных дефектных пикселей по интенсивности, дефектными считаются пиксели, не прошедшие фильтр либо по УР, либо по УК, интенсивность которых на отфильтрованном изображении (рис. 5в) равна 10. Пиксели, не прошедшие фильтр либо по УР, либо по УК, интенсивность которых на отфильтрованном изображении (рис. 5в) равна 255, определяются как области, не обработанные лазерным излучением. Результат обработки описанным методом изображения ТЛИППС (исходное СЭМ изображение которой показано на рис. 5а) представ-

лен на рис. 7. Белым показана область, не обработанная лазерным излучением, чёрным – области дефектов, а ТЛИППС представлена в виде оттенков серого.

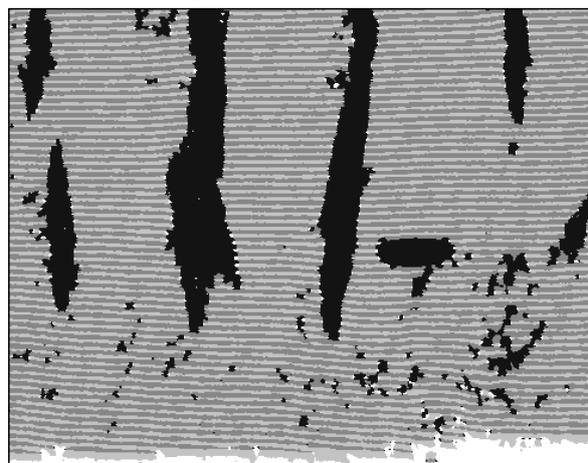


Рис. 7. Фрагмент изображения ТЛИППС, записанной при мощности пучка 300 мВт и скорости сканирования 125 мкм / с после фильтрации дефектов структуры и областей, не обработанных лазерным излучением

На рис. 8а показан фрагмент обработанного изображения ТЛИППС сложной формы, полученной в результате воздействия неподвижным астигматическим Гауссовым пучком (исходное СЭМ-изображение показано на рис. 4б). На рис. 8б показаны графики углового распределения, полученные при анализе всех пикселей обрабатываемого изображения (график А), при анализе пикселей области ТЛИППС, т.е. без учёта пикселей изображения в областях, не обработанных лазерным излучением (график В), и пикселей в эффективно записанной области ТЛИППС, т.е. без учёта дефектных областей (график С).

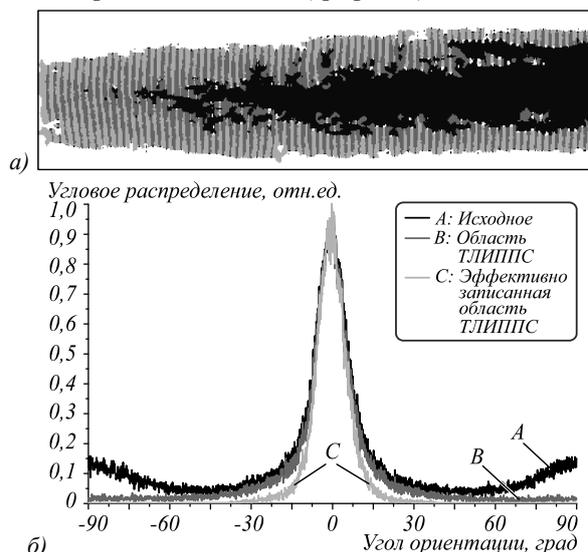


Рис. 8. Анализ ТЛИППС, сформированной при воздействии неподвижным астигматическим Гауссовым пучком мощностью 300 мВт в течение 1 секунды: фрагмент микроизображения после фильтрации дефектов структуры и областей, не обработанных лазерным излучением (а); сравнение графиков углового распределения на различных этапах фильтрации микроизображения (б)

В результате при анализе изображений исходный график УР не используется для определения параметров DLOA и НПУР. Вместо этого, по графику В определяются параметры $DLOA_{ТЛИППС}$ и $НПУР_{ТЛИППС}$, а по графику С – параметры $DLOA_{ЭФФ.ОБЛ}$ и $НПУР_{ЭФФ.ОБЛ}$.

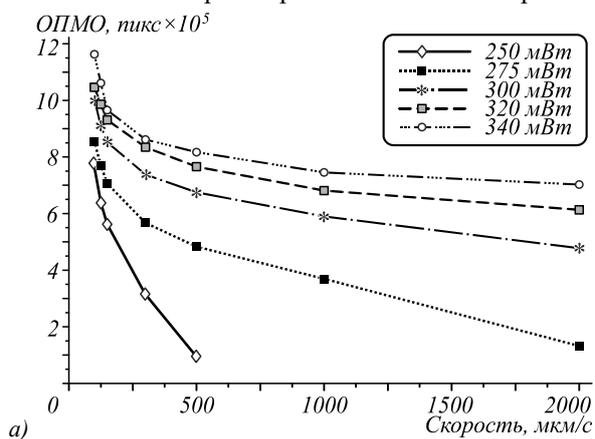
3. Экспериментальные результаты

Анализ СЭМ-изображений в программе ImageJ с использованием плагина OrientationJ выполнялся в модуле «Orientation Distribution» со структурным тензором «Gaussian Gradient» и параметром $\sigma=1$. Построение графиков УР производилось с шагом дискретизации по углу ориентации от $0,1^\circ$ до $0,5^\circ$.

Анализ ТЛИППС, записанных сканирующим астигматическим Гауссовым пучком

В данном параграфе представлены результаты анализа СЭМ-изображений ТЛИППС, показывающие влияние скорости сканирования и мощности записывающего астигматического Гауссова пучка на формирование периодической структуры.

На рис. 9а представлены зависимости относительной площади модифицированной области ТЛИППС на обрабатываемых микроизображениях. Так как обработ-



ка микроизображений при используемом нами методе осуществляется попиксельно, а все СЭМ-изображения получены при одинаковом разрешении, то и результаты относительной площади модифицированной области удобно приводить в пикселях. Кроме того, это наглядно демонстрирует, сколько пикселей использовалось при построении графиков УР и УК для того или иного изображения ТЛИППС. Полученные результаты показывают, что ОПМО растёт с увеличением мощности записывающего пучка (что ожидаемо), однако, как показано на рис. 9б, с увеличением мощности пучка на периодических структурах возрастает и площадь дефектов. Практически бездефектные структуры формируются при скоростях сканирования, не превышающих ≈ 100 мкм/с. При этом площадь дефектов на сформированной структуре при данной скорости сканирования практически не зависит от мощности записывающего пучка и составляет порядка 2–3% для мощностей 250–340 мВт. Интересно отметить, что резкий рост количества дефектов наблюдается при увеличении скорости сканирования от 100 до 150 мкм/с для мощности лазерного пучка в диапазоне 250–320 мВт и небольшой спад при скорости сканирования 300 мкм/с.

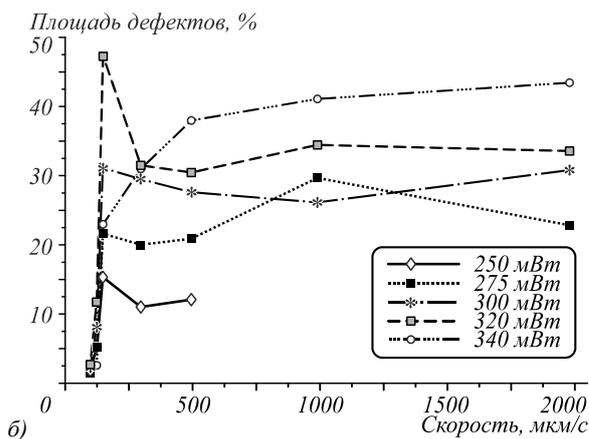


Рис. 9. Анализ ТЛИППС: относительная площадь модифицированной области на обрабатываемых СЭМ-изображениях (а); площадь дефектов на обрабатываемых микроизображениях (б)

Мы объясняем этот эффект тем, что при скорости сканирования образца, превышающей 100 мкм/с (рис. 1а), возникают локальные области, в которых поверх периодической структуры формируются островковые области неоднородностей оксидной плёнки (рис. 1б, рис. 5а), которые при обработке микроизображения определяются как дефекты структуры. При скорости сканирования 300 мкм/с и выше, вероятно, вся структура покрывается однородной оксидной плёнкой, из-за чего локальные неоднородности, вызванные этим эффектом на микроизображениях, пропадают (рис. 1в). Для мощности пучка 340 мВт такой эффект не был обнаружен. Возможно, это связано с тем, что уже при скорости сканирования 100 мкм/с вся структура покрыта слоем оксидной плёнки. Более того, при данной мощности качество структур, записанных при скоростях сканирования 100 и 125 мкм/с, было практически одинаковым, а дальнейшее увеличение скорости сканирования приводило к постепенному увеличению площади дефектов структуры.

На рис. 10а и рис. 10б приведены результаты определения параметров $DLOA_{ТЛИППС}$ и $НПУР_{ТЛИППС}$, характеризующие упорядоченность исследуемых ТЛИППС, а на рис. 11а и рис. 11б представлены параметры $DLOA_{ЭФФ.ОБЛ}$ и $НПУР_{ЭФФ.ОБЛ}$, при определении которых из анализа упорядоченности были исключены области дефектов исследуемых структур. Погрешность при определении параметров $DLOA_{ТЛИППС}$ и $DLOA_{ЭФФ.ОБЛ}$ мы считаем равной шагу дискретизации по углу ориентации $\Delta\alpha$, выбранному при построении графика УР в процессе анализа СЭМ изображения, который варьировался от $0,1^\circ$ до $0,5^\circ$.

Полученные результаты показывают, что возможность записи ТЛИППС на тонких плёнках хрома с высокой степенью упорядоченности зависит от скорости сканирования и мощности записывающего пучка. При этом для скоростей сканирования 100–125 мкм/с упорядоченность структур практически не зависит от мощности записывающего пучка,

однако дальнейшее увеличение скорости сканирования до 1000 мкм/с приводит к ухудшению данного параметра пропорционально как мощности пучка, так и скорости сканирования. В диапазоне скоростей 1000–2000 мкм/с упорядоченность структур суще-

ственно не изменялась. В диапазоне мощностей, достаточном для формирования ТЛИППС при скорости 2000 мкм/с, упорядоченность практически не зависела от мощности записывающего пучка, если из анализа исключались дефектные области (рис. 11).

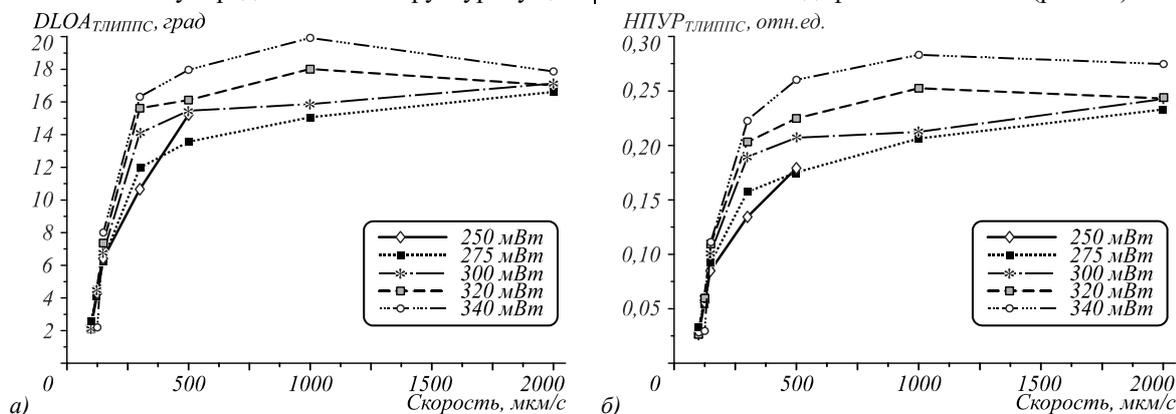


Рис. 10. Определение упорядоченности ТЛИППС: $DLOA_{\text{ТЛИППС}}$ (а) и $NPIR_{\text{ТЛИППС}}$ (б)

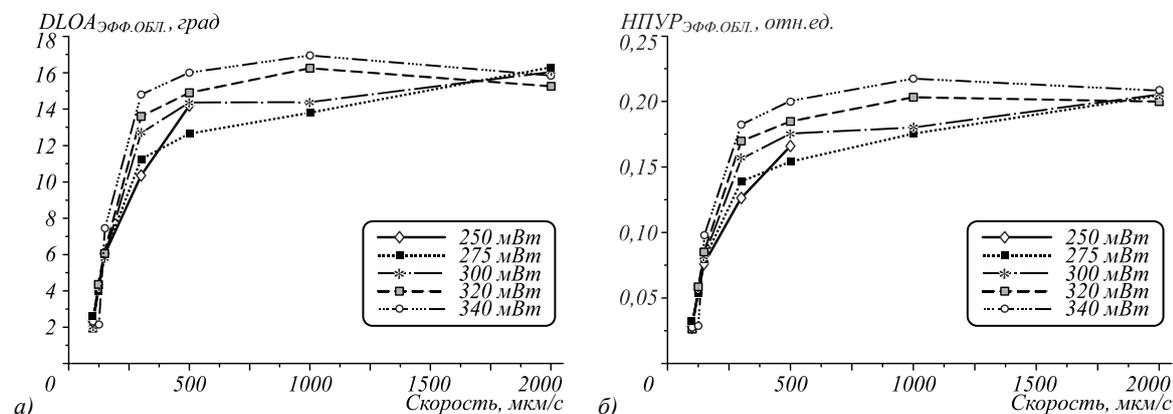


Рис. 11. Определение упорядоченности ТЛИППС без учёта дефектных областей: $DLOA_{\text{ЭФФ.ОБЛ.}}$ (а) и $NPIR_{\text{ЭФФ.ОБЛ.}}$ (б)

Анализ ТЛИППС, записанных неподвижным астигматическим Гауссовым пучком

В данном параграфе представлены результаты анализа СЭМ-изображений ТЛИППС, записанных при воздействии на образец в течение 1 секунды неподвижным астигматическим Гауссовым пучком с различной мощностью. Характерный вид данных структур представлен на рис. 4б (исходное СЭМ-изображение) и рис. 8а (изображение после обработки).

Вполне ожидаемо, что при увеличении мощности записывающего пучка вместе с увеличением площади следа (рис. 12а) увеличивается и область дефектов с 24% при мощности пучка 250 мВт до 48% при мощности 340 мВт (рис. 12б), что вызвано переэкспонированием центральной области сформированной структуры (рис. 4б, рис. 8а). При этом явной зависимости упорядоченности структуры в бездефектной области от мощности записывающего пучка не наблюдается (рис. 13а, б).

Заключение

Рассмотренный метод обработки микроизображений структур позволяет определять такие параметры, как относительная площадь модифицированной об-

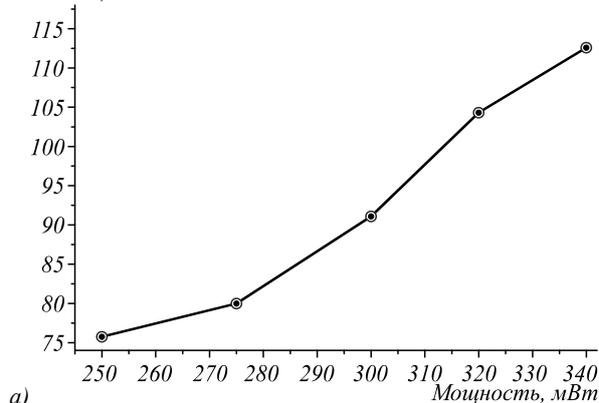
ласти и площадь дефектов на исследуемом микроизображении, а также упорядоченность, которая включает в себя анализ прямолинейности и параллельности дорожек, формирующих периодическую структуру. Преимуществом представленного метода является попиксельная обработка микроизображений, что позволяет исследовать структуры сложной формы и даёт возможность исключать из анализа упорядоченности области дефектов, общая площадь которых может быть сопоставима с площадью эффективно записанной периодической структуры. Последнее позволяет минимизировать вклад дефектных областей в полученные результаты. Предложенный метод был применён для анализа СЭМ-изображений ТЛИППС, сформированных при воздействии астигматического Гауссова пучка на поверхность плёнки хрома толщиной 30 нм, что позволило получить зависимости вышеописанных параметров от скорости сканирования и мощности записывающего пучка.

Благодарности

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Спектроскопия и оптика» ИАиЭ СО РАН, за счёт средств субсидии на финансовое обеспечение выполнения государственного задания (№ гос. реги-

страции АААА-А17-117052210002-7) в части обработки микроизображений и за счёт средств субсидии на финансовое обеспечение выполнения государ-

ОПМО, $\text{микс} \times 10^3$



ственного задания (№ гос. регистрации АААА-А17-117062110026-3) в части формирования ТЛИППС.

Площадь дефектов, %

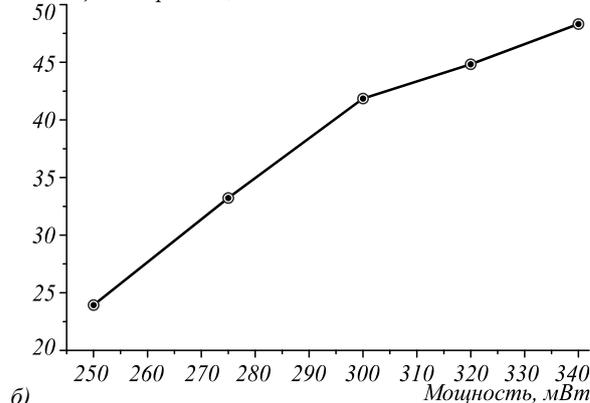


Рис. 12. Анализ ТЛИППС, записанных при воздействии неподвижным астигматическим Гауссовым пучком: относительная площадь модифицированной области на обрабатываемых СЭМ-изображениях (а); площадь дефектов на обрабатываемых микроизображениях (б)

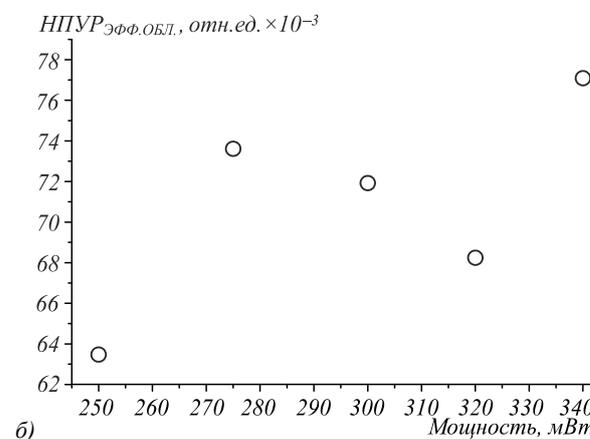
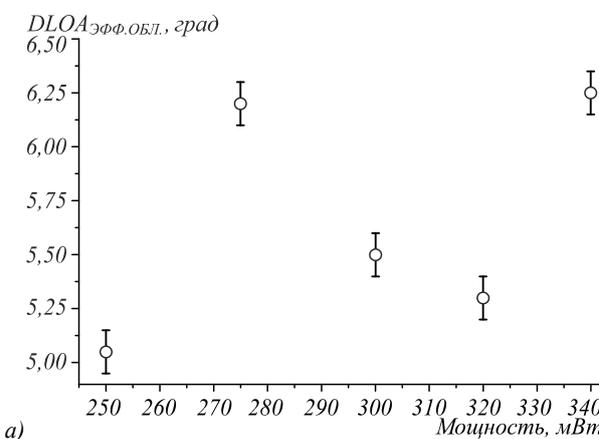


Рис. 13. Анализ ТЛИППС, записанных при воздействии неподвижным астигматическим Гауссовым пучком: $DLOA_{\text{ТЛИППС}}$ (а) и $НПУР_{\text{ТЛИППС}}$ (б)

Литература

1. **Camacho-López, S.** 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 // Applied Surface Science. – 2008. – Vol. 255, Issue 5. – P. 3028-3032. – DOI:10.1016/j.apsusc.2008.08.085.
2. **Öktem, B.** 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 // Nature Photonics. – 2013. – Vol. 7, Issue 11. – P. 897-901. – DOI: 10.1038/nphoton.2013.272.
3. **Dostovalov, A.V.** Formation of thermochemical laser-induced periodic surface structures on Ti films by a femtosecond IR Gaussian beam: regimes, limiting factors, and optical properties / A.V. Dostovalov, V.P. Korolkov, S.A. Babin // Applied Physics B. – 2017. – Vol. 123, Issue 1. – P. 30. – DOI: 10.1007/s00340-016-6600-z.
4. **Dostovalov, A.V.** 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 Electronics. – 2017. – Vol. 47, Issue 7. – P. 631-637. – DOI: 10.1070/QEL16379.
5. **Gnilitskiy, I.** High-speed manufacturing of highly regular femtosecond laser-induced periodic surface structures: physical origin of regularity / I. Gnilitskiy, T.J.-Y. Derrien, Y. Levy, N.M. Bulgakova, T. Mocek, L. Orazi // Scientific Reports. – 2017. – Vol. 7. – 8485. – DOI: 10.1038/s41598-017-08788-z.
6. **Dostovalov, A.V.** Oxide composition and period variation of thermochemical LIPSS on chromium films with different thickness / A.V. Dostovalov, V.P. Korolkov, K.A. Okotrub, K.A. Bronnikov, S.A. Babin // Optics Express. – 2018. – Vol. 26, Issue 6. – P. 7712-7723. – DOI: 10.1364/OE.26.007712.
7. **Bonse, J.** Laser-induced periodic surface structures – a scientific evergreen / J. Bonse, S. Höhm, S.V. Kirner, A. Rosenfeld, J. Krüger // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. – 2017. – Vol. 23, Issue 3. – P. 109-123. – DOI: 10.1109/JSTQE.2016.2614183.
8. **Müller, F.A.** Bio-inspired functional surfaces based on laser-induced periodic surface structures / F.A. Müller, C. Kunz, S. Gräf // Materials. – 2016. – Vol. 9, Issue 6. – P. 1-29. – DOI: 10.3390/ma9060476.
9. **Bonse, J.** Applications of laser-induced periodic surface structures (LIPSS) / J. Bonse, S.V. Kirner, S. Höhm, N. Epperlein, D. Spaltmann, A. Rosenfeld, J. Krüger // Proceedings of SPIE. – 2017. – Vol. 10092. – 100920N. – DOI: 10.1117/12.2250919.

10. **Достовалов, А.В.** Влияние скорости сканирования на формирование ТЛИПСС радиально-симметричным и эллиптическим гауссовым фемтосекундным лазерным пучком / А.В. Достовалов, В.С. Тереньтьев, К.А. Бронников, Д.А. Белоусов, В.П. Корольков // Прикладная фотоника. – 2018. – Т. 5, № 3. – С. 157-172. – DOI: 10.15593/2411-4367/2018.3.01.
11. **Rezakhaniha, R.** 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. Stergiopoulos // Biomechanics and Modeling in Mechanobiology. – 2012. – Vol. 11, Issue 3-4. – P. 461-473. – DOI: 10.1007/s10237-011-0325-z.
12. **Piispoki, Z.** Transforms and operators for directional bioimage analysis: A survey / Z. Piispoki, M. Storath, D. Sage, M. Unser. – In: Focus on bio-image informatics / ed. by W.H. De Vos, S. Munck, J.-P. Timmermans. – Switzerland: Springer International Publishing, 2016. – P. 69-93. – DOI: 10.1007/978-3-319-28549-8_3.
13. OrientationJ [Электронный ресурс]. – URL: <http://bigwww.epfl.ch/demo/orientation/> (дата обращения 22.05.2019).
14. **Schindelin, I.** 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, Issues 7-8. – P. 518-529. – DOI: 10.1002/mrd.22489.

Сведения об авторах

Белоусов Дмитрий Александрович, 1991 года рождения. В 2015 году окончил Новосибирский государственный технический университет по специальности «Лазерные системы в науке и технике». Работает инженером-программистом в лаборатории дифракционной оптики ИАиЭ СО РАН. Область научных интересов: дифракционная оптика, методы характеристики микроструктур, цифровая обработка изображений. E-mail: d.a.belousov91@gmail.com.

Достовалов Александр Владимирович, 1986 года рождения. В 2009 году окончил физический факультет Новосибирского государственного университета. Кандидат физ.-мат. наук с 2015 года. Старший научный сотрудник лаборатории волоконной оптики ИАиЭ СО РАН. В списке научных работ более 60 публикаций. Область научных интересов: лазерные технологии модификации материалов, волоконные решетки показателя преломления, системы лазерной записи, методы характеристики микроструктур. E-mail: dostovalov@iae.nsk.su.

Корольков Виктор Павлович, 1960 года рождения, в 1982 году окончил физический факультет Новосибирского государственного университета. Доктор технических наук с 2014 года. Заместитель директора по научной работе и заведующий лабораторией дифракционной оптики в ИАиЭ СО РАН. В списке научных работ более 210 публикаций. Область научных интересов: лазерная технология, системы лазерной записи, дифракционная оптика, методы характеристики микроструктур. E-mail: victork@iae.nsk.su.

Микерин Сергей Львович, в 1996 году окончил физический факультет Новосибирского государственного университета. Кандидат физ.-мат. наук с 2006 года. Заведующий лабораторией физики лазеров в ИАиЭ СО РАН. Область научных интересов: физика лазеров, нелинейно-оптические материалы, технологии интегральной оптики. E-mail: mikerin@iae.sbras.ru.

ГРНТИ: 29.33.47

Поступила в редакцию 25 марта 2019 г. Окончательный вариант – 17 июня 2019 г.

A microscope image processing method for analyzing TLIPSS structures

D.A. Belousov¹, A.V. Dostovalov^{1,2}, V.P. Korolkov¹, S.L. Mikerin¹

¹Institute of Automation and Electrometry of the SB RAS, 630090, Novosibirsk, Russia, Acad. Koptyug Ave 1,

²Novosibirsk State University, 630090, Novosibirsk, Russia, Pirogova St. 2

Abstract

The paper describes a method for processing microimages of thermochemical laser-induced periodic surface structures (TLIPSS) to quantify their structural order and defects. Results of its application for the analysis of microimages of periodic structures formed in 30-nm chromium films by an astigmatically focused femtosecond Gaussian laser beam have been presented. Dependences of the relative area of the beam-modified region, the area of defects, and the ordering of the periodic structures on the scanning speed and the writing beam power have been obtained.

Keywords: digital image processing, microscope image processing, laser materials processing, laser-induced periodic surface structures.

Citation: Belousov DA, Dostovalov AV, Korolkov VP, Mikerin SL. A microscope image processing method for analyzing TLIPSS structures. Computer Optics 2019; 43(6): 936-945. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-6-936-945.

Acknowledgements: In the research, we used the equipment of the multiple-access Center «Spectroscopy and Optics» at IA&E SB RAS. This work was supported by the Ministry of Educa-

tion and Science of the Russian Federation under grant AAAA-A17-117052210002-7 (Processing of microimages) and grant AAAA-A17-117062110026-3 (TLIPSS formation).

References

- [1] Camacho-López S, Evans R, Escobar-Alarcón L, Camacho-López MA, Camacho-López MA. Polarization-dependent single-beam laser-induced grating-like effects on titanium films. *Appl Surf Sci* 2008; 255(5): 3028-3032. DOI:10.1016/j.apsusc.2008.08.085.
- [2] Öktem B, Pavlov I, Ilday S, Kalaycıoğlu H, Rybak A, Yavaş S, Erdoğan M, Ilday FÖ. Nonlinear laser lithography for indefinitely large-area nanostructuring with femtosecond pulses. *Nat Photon* 2013; 7(11): 897-901. DOI: 10.1038/nphoton.2013.272.
- [3] Dostovalov AV, Korolkov VP, Babin SA. 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 B* 2017; 123(1): 30. DOI: 10.1007/s00340-016-6600-z.
- [4] Dostovalov AV, Korolkov VP, Terentyev VS, Okotrub KA, Dultsev FN, Babin SA. Study of the formation of thermochemical laser-induced periodic surface structures on Cr, Ti, Ni and NiCr films under femtosecond irradiation. *Quant Electron* 2017; 47(7): 631-637. DOI: 10.1070/QEL16379.
- [5] Gnilitkyi I, Derrien TJ-Y, Levy Y, Bulgakova NM, 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. DOI: 10.1038/s41598-017-08788-z.
- [6] Dostovalov AV, Korolkov VP, Okotrub KA, Bronnikov KA, Babin SA. Oxide composition and period variation of thermochemical LIPSS on chromium films with different thickness. *Opt Express* 2018; 26(6): 7712-7723. DOI: 10.1364/OE.26.007712.
- [7] Bonse J, Höhm S, Kirner SV, Rosenfeld A, Krüger J. Laser-induced periodic surface structures – a scientific evergreen. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* 2017; 23(3): 109-123. DOI: 10.1109/JSTQE.2016.2614183.
- [8] Müller FA, Kunz C, Gräf S. Bio-inspired functional surfaces based on laser-induced periodic surface structures. *Materials* 2016; 9(6): 1-29. DOI: 10.3390/ma9060476.
- [9] Bonse J, Kirner SV, Höhm S, Epperlein N, Spaltmann D, Rosenfeld A, Krüger J. Applications of laser-induced periodic surface structures (LIPSS). *Proc SPIE* 2017; 10092: 100920N. DOI: 10.1117/12.2250919.
- [10] Dostovalov AV, Terentyev VS, Bronnikov KA, Belousov DA, Korolkov VP. Influence of scanning speed on TLIPSS formation with axially symmetric and elliptical Gaussian fs laser beam [In Russian]. *Appl Photon* 2018; 5(3): 157-172. DOI: 10.15593/2411-4367/2018.3.01.
- [11] Rezakhaniha R, Agianniotis A, Schrauwen JTC, Griffa A, Sage D, Bouten CVC, van de Vosse FN, Unser M, Stergiopoulos N. Experimental investigation of collagen waviness and orientation in the arterial adventitia using confocal laser scanning microscopy. *Biomech Model Mechanobiol* 2012; 11(3-4): 461-473. DOI: 10.1007/s10237-011-0325-z.
- [12] Piispoki Z, Storath M, Sage D, Unser M. Transforms and operators for directional bioimage analysis: A survey. In Book: De Vos WH, Munck S, Timmermans J-P, eds. *Focus on bio-image informatics*. Switzerland: Springer International Publishing; 2016: 69-93. DOI: 10.1007/978-3-319-28549-8_3.
- [13] OrientationJ. Source: (<http://bigwww.epfl.ch/demo/orientation/>).
- [14] Schindelin I, Rueden CT, Hiner MC, Eliceiri KW. The ImageJ ecosystem: An open platform for biomedical image analysis. *Mol Reprod Dev* 2015; 82(7-8): 518-529. DOI: 10.1002/mrd.22489.

Author's information

Dmitrij Aleksandrovich Belousov (b. 1991) graduated from Novosibirsk State Technical University in 2015, majoring in Laser Systems in Science and Technology. Currently he works as the software engineer in Diffractive Optics laboratory of the Institute of Automation & Electrometry Siberian Branch of Russian Academy of Sciences (IA&E SB RAS). Research interests are diffractive optics, methods of microstructures characterization and digital image processing. E-mail: d.a.belousov91@gmail.com.

Alexander Vladimirovich Dostovalov (b. 1986) graduated from Novosibirsk State University in 2009. He received his PhD degree in Optics in 2015. He is senior research fellow of Fiber Optics Laboratory at IA&E SB RAS. His list of publications includes more than 60 titles. His research interests are currently focused on laser technology, laser writing systems, fiber Bragg gratings, methods of microstructures characterization. E-mail: dostovalov@iae.nsk.su.

Victor Pavlovich Korolkov (b. 1960) graduated from Novosibirsk State University in 1982. He received his DrSc degree in Technical Sciences in 2014. He is currently deputy director and head of Diffractive Optics Laboratory at IA&E SB RAS. His list of publications includes more than 210 titles. His research interests are currently focused on laser technology, laser writing systems, diffractive optics, methods of microstructures characterization. E-mail: victork@iae.nsk.su.

Sergey Lvovich Mikerin graduated from Novosibirsk State University in 1996, Physics department. He received his PhD degree in Optics in 2006. He is head of Physics of Lasers Laboratory in IA&E SB RAS. His research interests are currently focused on physics of lasers, nonlinear optical materials, and integrated optics. E-mail: mikerinsl@iae.sbras.ru.

Received March 25, 2019. The final version – June 17, 2019.