

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ МНОГОПУЧКОВОЙ ЛАЗЕРНОЙ ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ ЗАПИСИ ДИФРАКЦИОННЫХ МИКРОСТРУКТУР

Вейко В.П.¹, Синёв Д.А.¹, Шахно Е.А.¹, Полещук А.Г.², Саметов А.Р.², Седухин А.Г.²

¹ Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики,

² Институт автоматизации и метрологии Сибирского отделения РАН

Аннотация

Представлено теоретическое и экспериментальное исследование лазерной термохимической записи дифракционных структур в многопучковом многопроходном режиме. Получены дифракционные структуры на плёнке хрома с периодом 1,6 мкм при делении записывающего пучка решёткой Даммана на 5 пучков. Для повышения точности записи облучение плёнки проводилось за 5 проходов. Предложена методика расчёта температурных полей и распределения толщины окисла в плёнке при многопучковом воздействии. Проведённые расчёты выявили, что, несмотря на взаимное влияние температурных полей от отдельных источников, разрешающая способность записи оказывается достаточно высокой для получения структур микронного масштаба. Показано, что использование многопроходного режима облучения приводит к увеличению контраста и точности записываемых треков при сохранении высокого разрешения.

Ключевые слова: лазерное окисление, дифракционные структуры, металлическая плёнка.

Введение

Технология формирования поверхностных структур методом локального лазерного окисления тонких металлических плёнок уже многие годы исследовалась и использовалась для самых различных применений [1, 2]. В последние годы интерес к этой проблеме резко возрос в связи с тенденцией перехода многих приложений в область микро- и наноразмерных элементов.

Одним из перспективных направлений применения технологии локального лазерного окисления тонких металлических плёнок является изготовление дифракционных оптических элементов (ДОЭ) [3]. При этом существует ряд типов ДОЭ, для изготовления которых предпочтительной является не прямоугольная, а полярная система координат. К ним относятся основная часть фокусирующей оптики, формирователи бездифракционных пучков, корректоры асферических волновых фронтов и т. д. [4, 5, 6].

ДОЭ для коррекции, контроля и аттестации асферических волновых фронтов главных зеркал современных телескопов должны иметь точность выполнения кольцевой дифракционной структуры не хуже 0,05 мкм, минимальный период менее 1 мкм и размеры в несколько сотен миллиметров [7]. Дифракционные элементы такого типа изготавливаются с помощью специализированных устройств – круговых лазерных записывающих систем (КЛЗС) [8], используемых для записи полярную систему координат. Запись бинарных амплитудных микроструктур с помощью КЛЗС может быть осуществлена как посредством записи промежуточного изображения в фоторезисте, нанесённом на плёнку хрома, так и методом прямой лазерной записи в плёнках хрома, нанесённых на поверхность подложки. Нагрев лазерным лучом вызывает образование тонкого оксидного слоя на поверхности и изменение химико-физических

свойств по всей толщине плёнки [2, 9]. Этот термохимический эффект позволяет осуществить прямое формирование дифракционной структуры с пространственным разрешением свыше 1000 мм^{-1} на плёнках хрома [3, 10]. После экспонирования сфокусированным до минимального размера лазерным пучком плёнка хрома погружается в жидкостный щелочной травитель, в котором металлический хром растворяется значительно быстрее, чем оксид хрома. Маскирующее покрытие остаётся на тех участках, которые экспонировались лазерным пучком и защищены оксидным слоем. Прямой метод формирования дифракционных структур в плёнках хрома является оптимальным при изготовлении особо точных ДОЭ на нестандартных подложках (например, большого размера и толщины), так как устраняются операции нанесения и проявления фоторезиста.

Однако сканирующий метод прямой термохимической записи микроструктур имеет ряд ограничений, связанных с особенностями записываемых микроструктур. Как правило, ДОЭ с осевой симметрией имеют круговые зоны с шириной от долей микрона до единиц миллиметров. Причём в ряде случаев координаты границ зон должны быть выполнены с точностью до единиц нанометров [11]. При записи таких микроструктур возникают две проблемы: обеспечение надёжной и точной записи узких зон с шириной меньшей, чем размер сфокусированного лазерного пучка [12], и ускорение записи широких зон со сплошной заливкой [13].

Для решения этих проблем целесообразно применить метод многопучковой записи, как было предложено ранее для записи на фоторезисте [14]. Однако одним из ограничивающих факторов, который следует учитывать при практической реализации этого метода в устройствах типа КЛЗС, является взаимное тепловое влияние соседних пучков в расстре, наблюдающееся при расстоянии между пучка-

ми, меньшем либо сравнимом с расстоянием распространения тепла в плёнке за время действия импульса экспонирующего излучения.

В настоящей работе теоретически обоснована и экспериментально продемонстрирована возможность многопучковой прямой лазерной записи дифракционных структур на плёнках хрома термохимическим методом. Исследованы особенности многопроходной лазерной записи (сканирование плёнки по одному и тому же треку) узких зон ДОЭ. Выявлены изменения свойств плёнки при окислении в каждом проходе в

цепи положительной обратной связи, возникающей при многопроходной записи. Показана возможность прямой лазерной записи ДОЭ типа дифракционного аксикона с периодом 1,6 мкм.

1. Экспериментальная установка и методы записи ДОЭ

Исследуемые в настоящей работе методы записи были экспериментально реализованы с помощью КЛЗС CLWS-300IAE, упрощённая схема которой приведена на рис. 1.

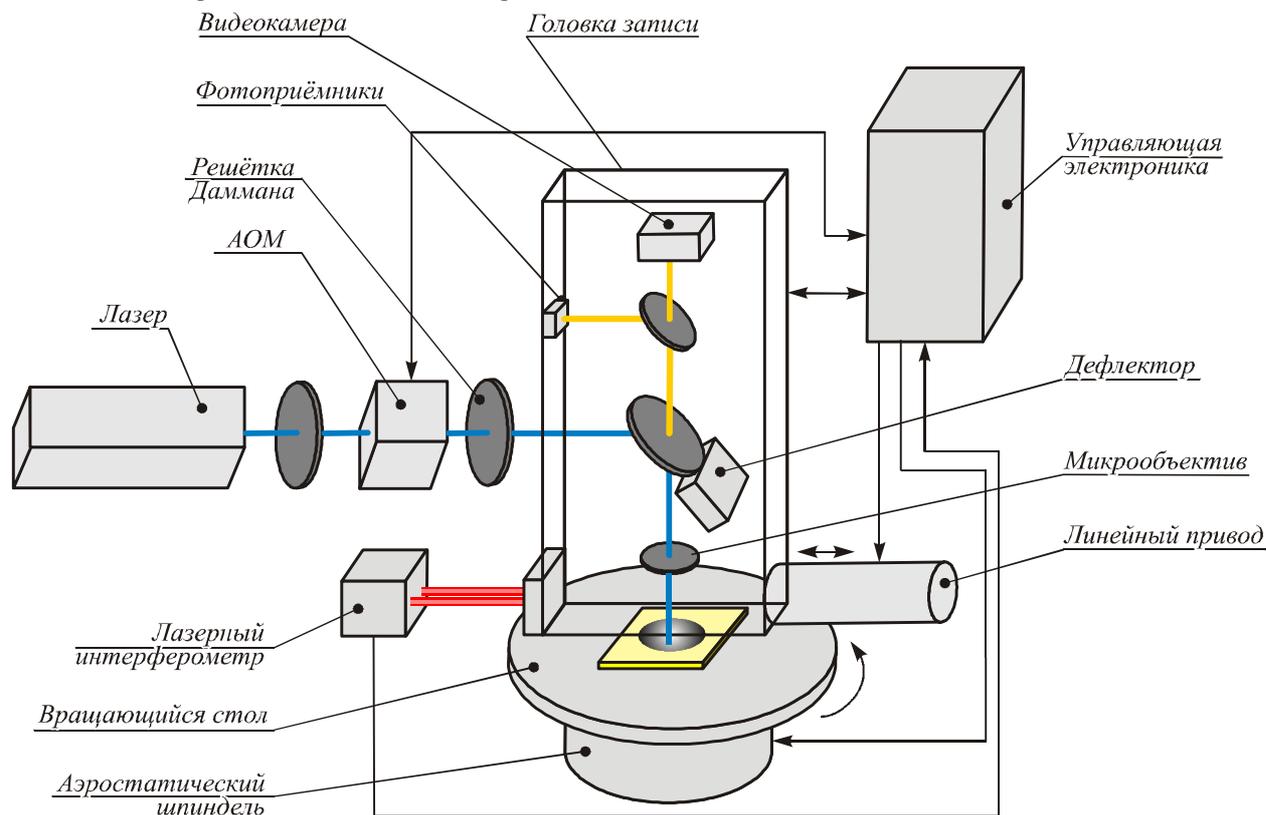


Рис. 1. Установка лазерной записи CLWS-300IAE

Плоская подложка, покрытая тонкой плёнкой хрома, крепится на вращающийся стол (угловая скорость $5-12 \text{ с}^{-1}$, что соответствует линейной скорости сканирования 2,2 м/с на радиусе 30 мм). Излучение записывающего лазера (532 нм, 0,6 Вт) модулируется системой акустооптических модуляторов (АОМ), проходит решётку Даммана (РД) и поступает к головке записи. Микрообъектив ($NA = 0,65$) фокусирует излучение на поверхность подложки. Перемещение головки записи в радиальном направлении осуществляется линейным приводом с погрешностью менее 20 нм (rms). Максимальный диаметр записываемой дифракционной структуры составляет около 300 мм.

Рассмотрим способы записи, обеспечивающие максимальную точность изготовления кольцевых ДОЭ с помощью КЛЗС.

Однопучковая запись. Запись зон с шириной от нескольких миллиметров до долей микрона выполняется повторяющимися проходами единственного сфокусированного записывающего пучка с пере-

крытием [13], как показано на рис. 2а. Алгоритм записи следующий (рис. 3). Радиальный шаг Δr кольцевого сканирования меняется исходя из требования симметричного заполнения зон, как это показано на рис. 3. Если радиальный шаг равен или несколько меньше эффективной ширины D записываемого в плёнке хрома трека, то запись выполняется тремя ($N=3$) кольцевыми проходами с шагом $\Delta r = (L-D)/2$, где L – ширина зоны с пропуском t (рис. 3). Если радиальный шаг превышает значение $\Delta r_{\max} = n \cdot D$, где n – коэффициент в пределах 0,5–0,8, то запись зон осуществляется за четыре прохода и более (при расширении зон). Таким образом, все зоны записываются с перекрытием, радиальный шаг для самых внешних проходов в зоне сохраняется равным Δr_{\max} , а между центральными проходами радиальный шаг непрерывно меняется от нуля до Δr_{\max} с последующим увеличением ширины зон. Изменение радиального шага позволяет точно фор-

мировать границы зон без неоправданного уменьшения шага записи, свойственного алгоритму записи с постоянным шагом. Запись узких зон при нескольких проходах [15] уменьшает влияние случайных ошибок позиционирования записывающего лазерного пятна, вибраций системы и переходных процессов каретки

линейного перемещения. В то же время многопроходная методика записи существенно уменьшает скорость записи КЛЗС. Многопроходное усреднение обеспечивает нужный эффект лишь в том случае, если ошибки действительно случайны. В других случаях эти улучшения менее заметны.

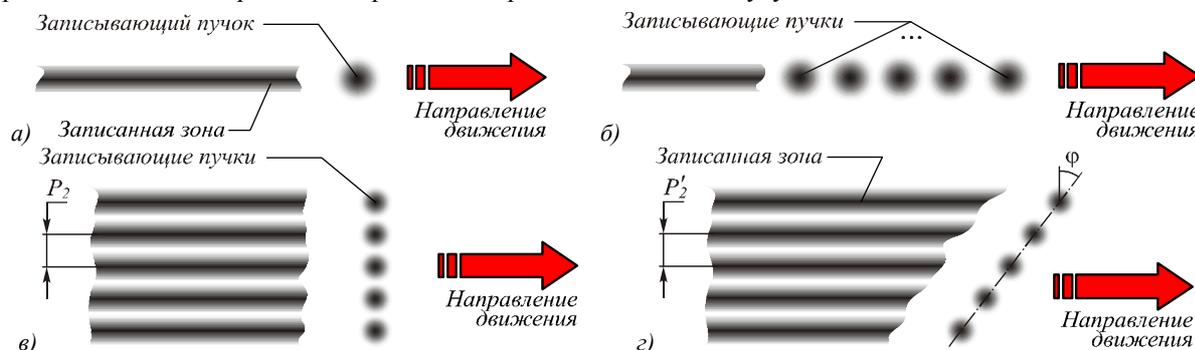


Рис. 2. Методы записи зон кольцевых ДОО одиночным записывающим пучком (а) и группой пучков при углах разворота $\varphi = 90^\circ$ (б), $\varphi = 0^\circ$ (в) и $\varphi = 60^\circ$ (г)

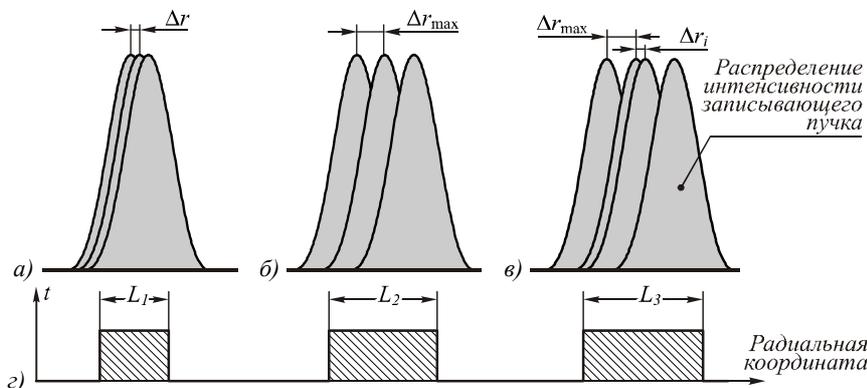


Рис. 3. Метод заполнения зон. Перекрывание кольцевых треков записывающего пучка (а, б, в) и записанные зоны в регистрирующем материале (г)

Многопучковая запись. Ускорение записи ДОО может быть достигнуто с одновременным использованием нескольких записывающих пучков. В устройствах для изготовления фотошаблонов микросхем применяются растры из 16, 32 или более сфокусированных лазерных пучков [14]. Оптический метод формирования многопучковой области записи предложен ранее авторами [16] и основан на расщеплении записывающего пучка решёткой Даммана, установленной перед фокусирующим объективом. Количество записывающих пятен может варьироваться от нескольких единиц до десятков при смене решёток. Период следования пятен в плоскости фоточувствительной поверхности P связан с основным периодом T_d решётки как $P = \lambda f / T_d$, где f – фокусное расстояние микрообъектива записи. Как было показано [16], при использовании лазерного излучения с длиной волны $\lambda = 0,5$ мкм и микрообъектива с числовой апертурой $NA = 0,65$ минимальное расстояние между отдельными пятнами ограничено величиной $\sim 1,5$ мкм в связи с необходимостью устранения паразитной интерференции. Для оперативного изменения периода записываемых зон растр сфокусированных пятен поворачивался на угол φ , что вызывало уменьшение периода следования записываемых

структур на коэффициент $\cos(\varphi)$, как показано на рис. 2б, в, г. В частности, при $\varphi = 90^\circ$ (рис. 2б) реализуется однотрековый многопроходный способ записи. Быстрая перестройка угла поворота пятен, а также изменение количества пятен в процессе записи могут быть обеспечены пространственным модулятором света [17]. Однако при многопучковой (и многопроходной) записи (ММЗ) остаётся не до конца ясным вопрос, почему при этом сохраняется (высокая) разрешающая способность однопучковой записи, и нельзя ли её ещё увеличить за счёт каких-либо специфических особенностей процесса ММЗ?

2. Теоретический анализ

а) Постановка задачи

Запись дифракционных структур методом локального лазерного окисления основана на тепловом действии излучения, и поэтому имеет естественные ограничения по минимальному периоду структуры. Эти ограничения связаны с размером области тепловой диффузии, который зависит от длительности воздействия излучения в каждой облучаемой точке поверхности и в используемых режимах обработки – диаметр пятна 0,4 мкм и скорость сканирования пучка

ка непрерывного излучения порядка 1 м/с – составляет несколько микрон. Резкая зависимость толщины образующегося окисла от температуры снижает это ограничение и, как это было показано нами ранее [18], позволяет получать дифракционные структуры с высоким разрешением. Однако при многопучковой записи структуры имеет место наложение тепловых полей от различных пучков, поэтому температура в областях между пучками повышается и условия записи становятся проблематичными. Рассмотрим теоретически возможность многопучковой записи ДОЭ с малым периодом методом локального лазерного окисления сканирующим пучком непрерывно излучения.

Для получения дифракционной структуры методом локального лазерного окисления плёнки хрома с последующим селективным травлением необходимо, чтобы толщины слоя окисла в центре записанных треков и посередине между ними различались настолько, чтобы в центре треков слой окисла защищал плёнку от травления, а между треками – нет. Для вычисления толщины слоя окисла в условиях многолучевого сканирования воспользуемся результатами теоретического расчёта для однолучевого сканирования, полученными нами в работе [18], согласно которым толщина слоя окисла H в каждой точке поверхности плёнки определяется следующим образом:

$$H = \sqrt{2B \exp\left(-\frac{T_a}{T_{\max}}\right) t_e}, \quad (1)$$

где $t_e = \sqrt{\frac{2\pi T_{\max}^2}{T_a |T''(t_0)|}}$ (2)

– эффективное время воздействия излучения [19], B – константа параболического окисления, T_a – энергия активации диффузионных процессов, выраженная в Кельвинах, t – текущее время;

$$T_{\max} = G \int_0^{\infty} \frac{\xi}{\xi^2 + b^2} e^{-\frac{\xi^2}{4}} J_0\left(\xi \frac{y}{r_0}\right) d\xi + T_H \quad (3)$$

– максимальная (во времени) температура в точке, T_H – начальная температура;

$$T''(t_0) = -\frac{GV^2}{r_0} \int_0^{\infty} \frac{\xi^2}{\xi^2 + b^2} e^{-\frac{\xi^2}{4}} \frac{J_1(\xi y/r_0)}{y} d\xi \quad (4)$$

– вторая производная от температуры по времени в момент t_0 , когда температура максимальна,

$$G = \frac{P(1-R)}{2\pi kh} e^{\frac{b^2}{4}} \text{ и } b = \frac{Vr_0}{2a}$$

– константы, $J_0(u)$ и $J_1(u)$ – функции Бесселя 1-го рода 0-го и 1-го порядка соответственно, V – скорость сканирования, y – расстояние от центра пятна, r_0 – размер облучённой области (характерный размер гауссова распределения), P – мощность излучения, h – толщина плёнки, R , k , a – коэффициент отражения, теплопроводность и температуропроводность плёнки соответственно.

Таким образом, определение зависимости температуры плёнки от времени в каждой точке плёнки позволяет определить структуру образующегося окисла. Последующее травление плёнки формирует её топографию за счёт удаления участков плёнки, не защищённых слоем окисла достаточной толщины.

При многопучковом воздействии излучения результирующее температурное поле в плёнке является суперпозицией температурных полей от каждого отдельного лазерного пучка. При этом температурное поле сглаживается, значения температуры повышаются в промежутках между засвеченными областями до значений, близких к максимальным (в областях, соответствующих центрам треков), в результате чего разница между максимальной и минимальной толщиной окисла может оказаться недостаточной для реализации требуемого разрешения.

б) Расчёт толщины слоя окисла при многопучковом и многопроходном воздействии

Расчёт температурных полей и пространственного распределения толщин окислов для различного количества пучков был проведён на основе суперпозиции температурных полей от отдельных пучков по формулам (2)–(4) и определении соответствующей толщины слоя окисла по формуле (1). Расчёты проводились для облучения без разворота раstra лазерных пятен. При наличии разворота расстояние между записанными треками уменьшается, но расстояние между зонами воздействия излучения остаётся прежним. Таким образом, наличие разворота раstra сводится к нарушению симметрии теплового поля относительно центрального пятна, остальные закономерности остаются прежними.

Основные результаты расчётов приведены ниже. Расчёты представлены для режимов, когда максимальная температура плёнки, достигаемая в процессе облучения, близка к температуре плавления, что соответствует наиболее благоприятным условиям получения топологических структур. Скорость сканирования принята равной 0,5 м/с.

Суперпозиция температурных полей от двух различных источников суммарной мощностью 7,5 мВт, расположенных на расстоянии 3,2 мкм друг от друга, и соответствующее распределение толщины слоя окисла представлены на рис. 4. Начало координат соответствует середине расстояния между облучёнными областями. Для сравнения показано распределение температуры и толщины слоя окисла для одного источника мощностью 5,7 мВт. Характер температурного поля для двух источников оказывается более сглаженным по сравнению с воздействием одного пучка. Однако наблюдаемый перепад температуры около 310 К между точкой $y=1,6$ мкм, соответствующей середине трека ($T=2180$ К), и точкой $y=0$ мкм ($T=1870$ К), соответствующей середине расстояния между соседними треками, создаёт в этих точках разницу толщин слоёв окисла 1,5 нм, достаточную для селективного травления.

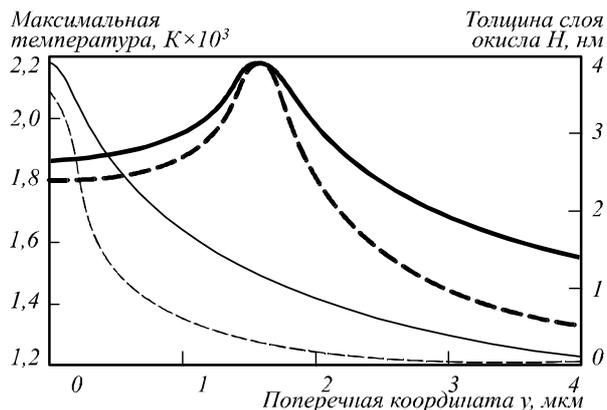


Рис. 4. Температурное поле плёнки (сплошная линия) и пространственное распределение толщины слоя окисла (пунктирная линия) при сканировании её поверхности одним источником излучения (тонкие линии), а также при совместном сканировании двумя источниками (жирные линии), расположенными на расстоянии 3,2 мкм друг от друга (координата $x = 0$ соответствует середине расстояния между источниками)

Расчёт совместного действия пяти сканирующих пучков при суммарной мощности излучения источников, равной 10 мВт, даёт значения температуры в центре среднего трека около 2210 К и посередине между средним треком и ближайшим к нему 2000 К при начальной температуре 293 К (рис. 5).

Разница между третьим максимумом и первым минимумом, определяющая возможности регистрации пяти отдельных треков, составляет 25 К. Таким образом, раздельная регистрация отдельных треков при окислении и последующем травлении плёнки представляется возможной, однако сильное взаимное влияние температурных полей может оказаться причиной того, что надёжная запись структуры ДОО при одном проходе будет проблематичной.

В свете сказанного выше представляет интерес изучение возможности использования многократного облучения при меньшей мощности пучка для повышения качества и надёжности термохимической регистрации отдельных треков. Рассмотрим подробнее, как влияет повторное облучение на результаты воздействия.

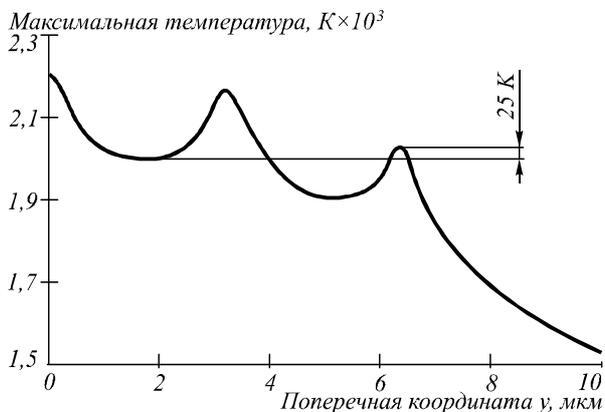


Рис. 5. Температурное поле плёнки при совместном сканировании её поверхности пятью источниками, расположенными на расстоянии 3,2 мкм друг от друга

После первого прохода, вследствие формирования на поверхности металла слоя окисла, коэффициент отражения излучения от поверхности уменьшается, а поглощательная способность увеличивается. Толщина образующегося слоя окисла сильно зависит от мощности воздействующего излучения. Расчётные зависимости возникающих максимальной температуры и толщины слоя окисла в центре области воздействия от поглощательной способности приведены на рис. 6. Значения поглощательной способности 0,45 и 0,94 с левого и правого краёв графика соответствуют значениям поглощательной способности хрома и его оксида Cr_2O_3 соответственно.

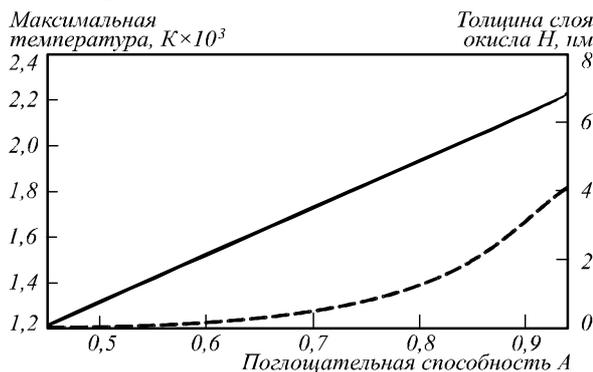


Рис. 6. Зависимости температуры обрабатываемой области (сплошная) и толщины слоя окисла (пунктир) от поглощательной способности плёнки (расчитано для середины пятна, мощность – 3 Вт)

Таким образом, наличие окисного слоя, образованного при первом проходе, толщина которого может быть недостаточной для селективного травления, на втором и последующих проходах резко усиливает поглощение излучения и, соответственно, толщину образующегося слоя окисла. Поэтому при повторном облучении этот тонкий слой окисла служит элементом положительной обратной связи: увеличение поглощательной способности в ранее облучённой области приводит к повышению общего уровня температурного поля и, следовательно, образованию слоя окисла большей толщины. В результате разница в толщинах окисла в облучённых областях и между ними резко увеличивается, что приводит к более надёжной регистрации отдельных треков. С другой стороны, образование слоя окисла приводит также к изменению теплофизических свойств плёнки, а именно: к уменьшению её теплопроводности. Поэтому с каждым новым проходом локальное увеличение толщины слоя окисла приводит к уменьшению рассеяния тепла за счёт теплопроводности, концентрации тепла в облучённых областях и, соответственно, увеличению контраста и надёжности записи треков.

К сожалению, точный расчёт толщины слоя окисла при многократном воздействии не представляется возможным из-за отсутствия данных о зависимости поглощательной способности плёнки от толщины слоя её поверхностного окисла, однако оказывается возможным исследовать общие закономерности про-

цесса. Расчёт температуры и толщины слоя окисла для трёх последовательных проходов одним пучком был проведён в приближении, что значение поглощательной способности плёнки при образовании окисла скачкообразно меняется на значение поглощательной способности окисла, а теплопроводность и температуропроводность плёнки зависят линейно от толщины слоя окисла. Поперечные распределения толщины слоя окисла для двух и трёх последовательных проходов представлены на рис. 7.

3. Экспериментальное исследование

Исследования многопучкового способа записи проводились с РД, осуществляющей деление излучения лазера на 5 пучков. Основной период РД был выбран равным 0,6 мм, что обеспечивало шаг сфокусированных пятен в растре около 3 мкм. Уменьшение периода записываемой дифракционной структуры осуществлялось разворотом раstra. Для устранения остаточной паразитной интерференции смежных световых пучков и точной коррекции равномерности их деления на основе численного моделирования прово-

дилась юстировка оптимального положения РД в направлении дисперсии. Изображение структуры бинарно-фазовой РД с коэффициентом разветвления 5, а также распределение излучения в фокальной плоскости микробъектива и результаты записи приведены на рис. 8.

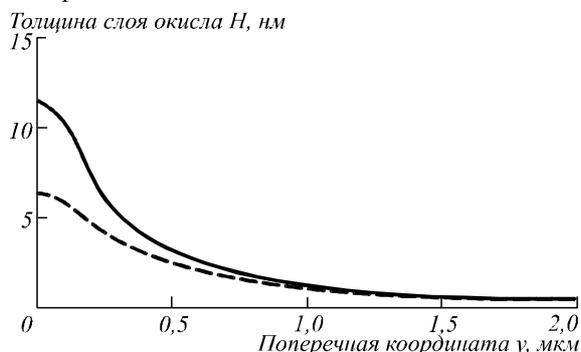


Рис. 7. Пространственные распределения толщины слоя окисла при однолучевом воздействии на слой хрома и оксида хрома Cr_2O_3 при мощности излучения 3 мВт при двух (пунктир) и трёх (сплошная) проходах

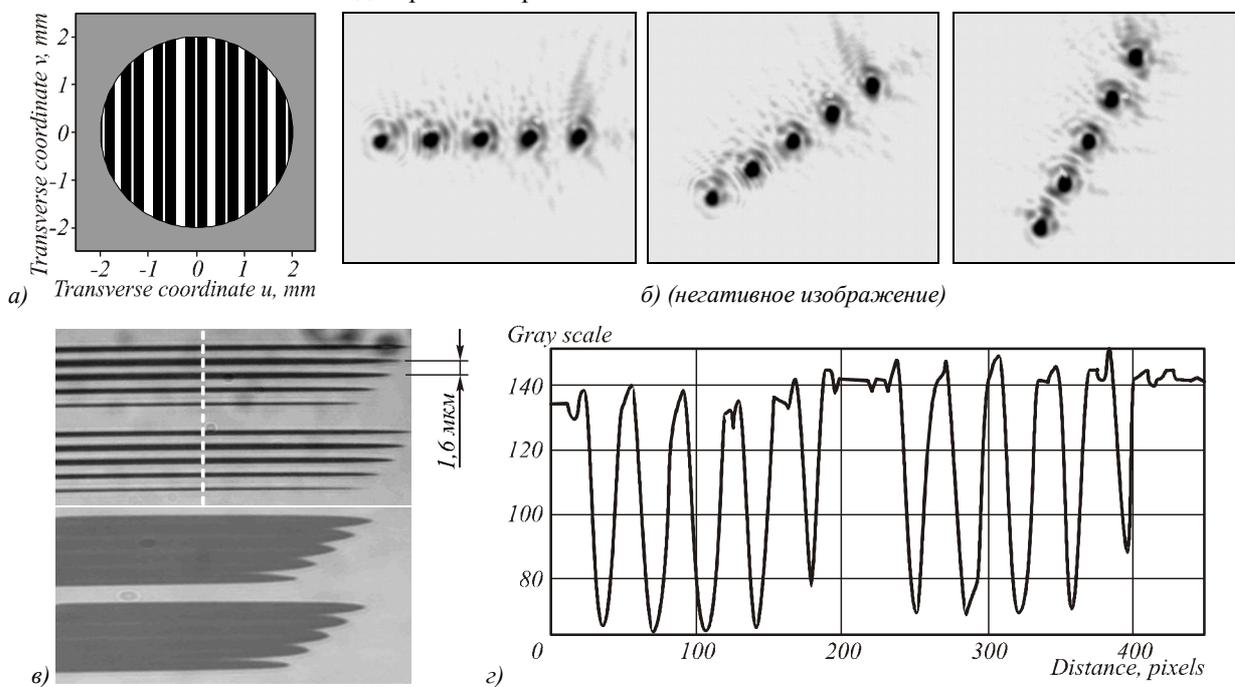


Рис. 8. Вид функции пропускания РД (а), распределения излучения в фокальной плоскости микробъектива при развороте РД на 90, 45 и 60 градусов (б), фотографии записанных структур (в) и поперечного сечения зоны записи (г)

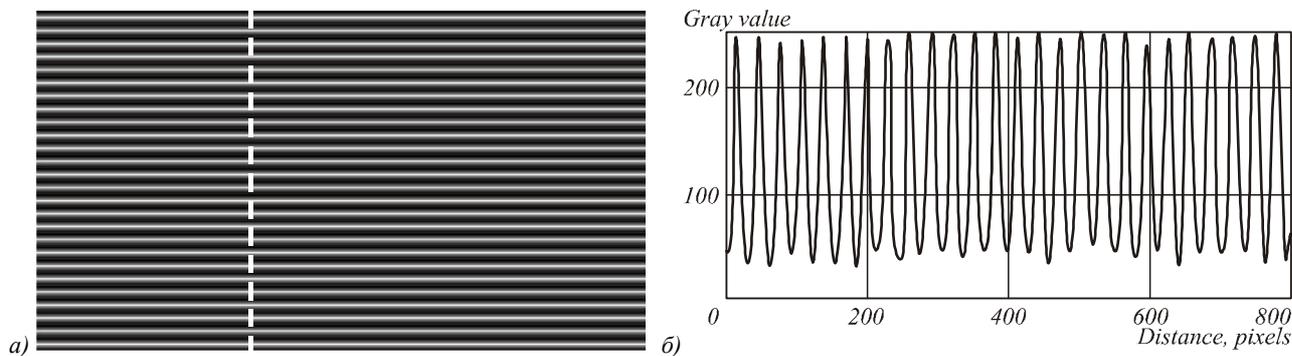


Рис. 9. Фотография (а) фрагмента дифракционного аксикона и скан поперечного пропускания (б)

Исследовалась запись дифракционных структур методом лазерной термохимии по тонкой плёнке хрома, напылённой методом магнетронного распыления на подложку из оптического стекла. Толщина плёнки хрома составляла около 40 нм. Скорость сканирования поверхности плёнки равнялась 0,2–0,5 м/с. Исследовалась запись структур при нескольких значениях угла поворота раstra записывающих пучков, разных радиусах записи (разных скоростях движения подложки относительно пучков) и разных мощностях записи. На рис. 8в приведены типичные фотографии тестовой записи треков по плёнке хрома с постоянным периодом 1,6 мкм после проявления в селективном травителе. На рис. 8г – скан поперечного сечения зоны записи.

На рис. 9 представлен пример записи кольцевой дифракционной решётки (дифракционного аксикона). Шаг записи составлял 1,6 мкм и был синхронизован с периодом раstra записывающих пучков $P'_2 = 1,6$ мкм. Такой метод записи обеспечивает эффективное усреднение погрешностей координатной системы установки записи, так как каждая зона аксикона записывается за 5 последовательных проходов.

Заключение

Экспериментально реализован многопучковый вариант лазерного термохимического метода записи дифракционных структур на плёнках хрома. Формирование раstra записывающих пучков обеспечивает РД, установленная перед фокусирующим объективом. Изменение периода записываемой структуры и точная коррекция равномерности деления лазерного пучка обеспечиваются, соответственно, поворотом и поперечным смещением РД (в направлении её дисперсии). Полученные результаты показали возможность записи высококачественной кольцевой решётки (дифракционного аксикона) с периодом 1,6 мкм.

Результаты теоретических исследований температурного распределения и распределения толщины слоя окисла при многопучковом и многопроходном воздействии выявили следующие закономерности. Взаимное влияние температурных полей при многопучковом лазерном воздействии на плёнку приводит к тому, что результирующие градиенты температуры значительно уменьшаются по сравнению с однопучковым воздействием, а разница толщин слоя окисла в серединах треков и между ними уменьшается. С увеличением количества пучков это влияние усиливается, так что надёжная запись структуры при высоком разрешении (с периодом $\sim 1,6$ мкм), реальная для двух пучков, для пяти пучков при однопроходной записи становится проблематичной.

Вместе с тем поворот решётки Даммана позволяет существенно снизить термические ограничения записи фактически за счёт сдвига облучения соседних треков во времени.

В свою очередь, использование многопроходного метода записи позволяет значительно повысить контраст и надёжность записи структуры. Это обеспечивается тем, что оптические и теплофизические свойства

оксида значительно отличаются от свойств металла. В результате при многопроходном воздействии образуется положительная обратная связь между толщиной слоя окисла и температурой плёнки, и с каждым последующим проходом разница в толщинах слоя окисла в серединах треков и между ними увеличивается, то есть усиливается контраст записи. Такая ситуация имеет место до тех пор, пока не наступит стабилизация: произойдёт окисление плёнки на всю её толщину или поглотительная способность плёнки станет равна поглотительной способности окисла. Численное моделирование эффекта повышения точности радиально-позиционирования результирующих треков за счёт их многопроходной записи и усреднения ошибок позиционирования лазерных пучков на отдельных шагах записи (оборотах подложки) в настоящей работе не проводилось. Однако микроскопические и спектральные исследования записанных структур продемонстрировали проявление указанного эффекта. Таким образом, использование многопроходного многопучкового метода позволяет осуществить качественную запись структуры дифракционных элементов с высоким разрешением.

Благодарности

Данная работа выполнена при поддержке междисциплинарного интеграционного проекта № 112 СО РАН, программы фундаментальных исследований Президенту РАН, проект 24-8, проектов РФФИ 12-02-00974-а, 12-02-01118-а, РФФИ 10-02-00208 и 12-02-01194а, Госконтракта РФ № 11.519.11.4017, гранта Президента РФ по ведущей научной школе НШ-619.2012.2.

Литература

1. **Korolkov, V.P.** Laser writing systems and technologies for fabrication of binary and continuous relief diffractive optical elements / V.P. Korolkov, A.G. Poleshchuk. – Proc. SPIE 6732: International Conference on Lasers, Applications, and Technologies 2007: Laser-assisted Micro- and Nanotechnologies, 67320X, 2007, June 28.
2. **Metev, S.M.** Thermochemical action of laser radiation on thin metal films / S.M. Metev, V.P. Veiko, S.G. Savchenko, G.A. Kotov, G.D. Shandybina // IEEE J. Quant. Electr. – 1981. – V. 17, N 9. – P. 2004-2007.
3. **Вейко, В.П.** Исследование пространственного разрешения лазерной термохимической технологии записи дифракционных микроструктур / В.П. Вейко, В.И. Корольков, А.Г. Полещук, А.Р. Саметов, Е.А. Шахно, М.В. Ярчук // Квантовая электроника. – 2011. – Т. 41, № 7. – С. 631-636.
4. Методы компьютерной оптики / под. ред. В.А. Сойфера. – М.: Физматлит, 2000. – 688 с.
5. **Neugebauer, G.** Computer-generated holograms: carrier of polar geometry / G. Neugebauer, R. Hauck, O. Bryngdahl // Appl. Optics. – 1985. – Vol. 24. – P. 777-784.
6. **Morris, G.M.** Achromatic and apochromatic diffractive singlets / G.M. Morris, D. Faklis // Diffractive Optics: Design, Fabrication and Application. Conference, Rochester, N.Y. JMC4-1/53, 1994. – P. 53.
7. **Burge, J.H.** Application of computer-generated hologram for interferometric measurement of large aspheric optics / J.H. Burge // Proc. of SPIE. – 1995. – V. 2576. – P. 258-269.
8. **Poleshchuk, A.G.** Polar coordinate laser pattern generator for fabrication of diffractive optical elements with arbitrary struc-

- ture / A.G. Poleshchuk, E.G. Churin, V.P. Koronkevich, V.P. Korolkov, A.A. Kharissov, V.V. Cherkashin, V.P. Kiryanov, A.V. Kiryanov, S.A. Kokarev, A.G. Verhoglyad // *Appl. Opt.* – 1999. – Vol. 38. – P. 1295-1301.
9. **Коронкевич, В.П.** Лазерная термохимическая технология синтеза дифракционных оптических элементов в плёнках хрома / В.П. Коронкевич, А.Г. Полещук, Е.Г. Чуринов, Ю.И. Юрлов // *Квантовая электроника.* – 1985. – № 4. – С. 755.
 10. **Cherkashin, V.V.** Processing parameters optimisation for thermochemical writing of DOEs on chromium films / V.V. Cherkashin, E.G. Churin, V.P. Korolkov, V.P. Koronkevich, A.A. Kharissov, A.G. Poleshchuk, J. H. Burge // *Diffraction and Holographic Device Technologies and Applications IV*, I. Cindrich and S.H. Lee, eds. – SPIE. – 1997. – Vol. 3010. – P. 168-179.
 11. **Chang, Yu-C.** Error analysis for CGH optical testing / Yu-C. Chang, J.H. Burge // *Proc. SPIE.* – 1999. – Vol. 3782. – P. 358-366.
 12. **Полещук, А.Г.** Погрешности термохимического метода записи микроизображений в плёнках хрома / А.Г. Полещук // *Автометрия.* – 2003. – Т. 39, № 6. – С. 39-45.
 13. **Полещук, А.Г.** Методы минимизации ошибок прямой лазерной записи дифракционных оптических элементов / А.Г. Полещук, В.П. Корольков, В.В. Черкашин, С. Райхельт, Дж. Бёдж // *Автометрия.* – 2003. – Т. 38, № 3. – С. 3-19.
 14. **Valentin, G.E.** Improved throughput in 0.6-NA laser reticle writers / G.E. Valentin, H.Cr. Hamaker, J.P. Daniel // *SPIE.* – 1997. – Vol. 3764. – P. 46-57.
 15. **Hamaker, W.H.** Optimizing the use of multipass printing to minimize printing errors in advanced laser reticle-writing systems / W.H. Hamaker, G. Burns and P. Buch // *15th Annual BACUS Symposium on Photomask Technology and Management*, SPIE 2621, 1995. – P. 319-328.
 16. **Полещук, А.Г.** Многопучковая прямая лазерная запись дифракционных микроструктур / А.Г. Полещук, В.П. Корольков, А.Г. Седухин, А.Р. Саметов, А.И. Малышев // *Автометрия.* – 2012. – Т. 48, № 4. – С. 3-11.
 17. **Chattrapiban, N.** Generation of nondiffracting Bessel beams by use of a spatial light modulator / N. Chattrapiban, E. Rogers, D. Cofield, W. Hill, R. Roy // *Opt. Lett.* 2003. – Vol. 28. – P. 2183-2185.
 18. **Veiko, V.P.** Local laser oxidation of thin metal films: ultra-resolution in theory and in practice / V.P. Veiko, E.A. Shakhno, A.G. Poleshchuk, V.P. Korolkov, V.N. Matyzhonok // *Journal of Laser Micro/Nanoengineering.* – 2008. – V. 3, N 3. – P. 201-205.
 19. **Либенсон, М.Н.** Лазерно-индуцированные оптические и термические процессы в конденсированных средах и их взаимное влияние / М.Н. Либенсон. – СПб.: Наука, 2007. – 423 с.
 4. *Methods of Computer Optics* / ed. by V.A. Soifer – Moscow: “Fizmatlit” Publisher, 2000. – 688 p. – (In Russian).
 5. **Neugebauer, G.** Computer-generated holograms: carrier of polar geometry / G. Neugebauer, R. Hauck, O. Bryngdahl // *Appl. Optics.* – 1985. – Vol. 24. – P. 777-784.
 6. **Morris, G.M.** Achromatic and apochromatic diffractive singlets / G.M. Morris, D. Faklis // *Diffraction Optics: Design, Fabrication and Application*. Conference, Rochester, N.Y. JMC4-1/53, 1994. – P. 53.
 7. **Burge, J.H.** Application of computer-generated hologram for interferometric measurement of large aspheric optics / J.H. Burge // *Proc. of SPIE.* – 1995. – V. 2576. – P. 258-269.
 8. **Poleshchuk, A.G.** Polar coordinate laser pattern generator for fabrication of diffractive optical elements with arbitrary structure / A.G. Poleshchuk, E.G. Churin, V.P. Koronkevich, V.P. Korolkov, A.A. Kharissov, V.V. Cherkashin, V.P. Kiryanov, A.V. Kiryanov, S.A. Kokarev, A.G. Verhoglyad // *Appl. Opt.* – 1999. – Vol. 38. – P. 1295-1301.
 9. **Koronkevich, V.P.** Laser thermochemical technology for synthesizing optical diffraction elements utilizing chromium films / V.P. Koronkevich, A.G. Poleshchuk, E.G. Churin, Yu. Yurlov // *SOV. J. QUANTUM ELECTRON.* – 1985. – Vol. 15, N 4. – P. 755.
 10. **Cherkashin, V.V.** Processing parameters optimisation for thermochemical writing of DOEs on chromium films / V.V. Cherkashin, E.G. Churin, V.P. Korolkov, V.P. Koronkevich, A.A. Kharissov, A.G. Poleshchuk, J. H. Burge // *Diffraction and Holographic Device Technologies and Applications IV*, I. Cindrich and S.H. Lee, eds. – SPIE. – 1997. – Vol. 3010. – P. 168-179.
 11. **Chang, Yu-C.** Error analysis for CGH optical testing / Yu-C. Chang, J.H. Burge // *Proc. SPIE.* – 1999. – Vol. 3782. – P. 358-366.
 12. **Poleshchuk, A.G.** Errors of Diffraction Structure Formation by Laser Thermochemical Writing / A.G. Poleshchuk // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing (Avtometriya).* – 2003. – Vol. 39, N 6. – P. 39-45. – (In Russian).
 13. **Poleshchuk, A.G.** Methods for minimizing the errors in direct laser writing of diffractive optical elements / A.G. Poleshchuk, V.P. Korolkov, V.V. Cherkashin, S. Reichelt, J.H. Burge // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing (Avtometriya).* – 2003. – Vol. 38, N 3. – P. 3-19. – (In Russian).
 14. **Valentin, G.E.** Improved throughput in 0.6-NA laser reticle writers / G.E. Valentin, H.Cr. Hamaker, J.P. Daniel // *SPIE.* – 1997. – Vol. 3764. – P. 46-57.
 15. **Hamaker, W.H.** Optimizing the use of multipass printing to minimize printing errors in advanced laser reticle-writing systems / W.H. Hamaker, G. Burns and P. Buch // *15th Annual BACUS Symposium on Photomask Technology and Management*, SPIE 2621, 1995. – P. 319-328.
 16. **Poleshchuk, A.G.** Multibeam direct laser writing of diffractive microstructures / A.G. Poleshchuk, A.G. Sedukhin, A.R. Sametov, A.I. Malyshev // *Instrumentation and Data Processing (Avtometriya).* – 2012. – V. 48, no 4. – P. 3-11. – (In Russian).
 17. **Chattrapiban, N.** Generation of nondiffracting Bessel beams by use of a spatial light modulator / N. Chattrapiban, E. Rogers, D. Cofield, W. Hill, R. Roy // *Opt. Lett.* 2003. – Vol. 28. – P. 2183-2185.
 18. **Veiko, V.P.** Local laser oxidation of thin metal films: ultra-resolution in theory and in practice / V.P. Veiko, E.A. Shakhno, A.G. Poleshchuk, V.P. Korolkov, V.N. Matyzhonok // *Journal of Laser Micro/Nanoengineering.* – 2008. – V. 3, N 3. – P. 201-205.
 19. **Libenson, M.N.** Laser-Induced Optical and Thermal Processes in Condensed Media and Their Mutual Influence / M.N. Libenson. – Saint-Petersburg: “Nauka” Publisher, 2007. – 423 p. – (in Russian).

References

1. **Korolkov, V.P.** Laser writing systems and technologies for fabrication of binary and continuous relief diffractive optical elements / V.P. Korolkov, A.G. Poleshchuk. – *Proc. SPIE 6732: International Conference on Lasers, Applications, and Technologies 2007: Laser-assisted Micro- and Nanotechnologies*, 67320X, 2007, June 28.
2. **Metev, S.M.** Thermochemical action of laser radiation on thin metal films / S.M. Metev, V.P. Veiko, S.G. Savchenko, G.A. Kotov, G.D. Shandybina // *IEEE J. Quant. Electr.* – 1981. – V. 17, N 9. – P. 2004-2007.
3. **Veiko, V.P.** Study of the spatial resolution of laser thermochemical technology for recording diffraction microstructures / V.P. Veiko, V.I. Korolkov, A.G. Poleshchuk, A.R. Sametov, E.A. Shakhno, M.V. Yarchuk // *QUANTUM ELECTRON.* – 2011. – V. 41, N 7. – P. 631-636. – (In Russian).

RESEARCHING THE FEATURES OF MULTIBEAM LASER THERMOCHEMICAL RECORDING OF DIFFRACTIVE MICROSTRUCTURES

V.P. Veiko¹, D.A. Sinev¹, E.A. Shakhno¹, A.G. Poleshchuk², A.R. Sametov², A.G. Sedukhin²

¹ Saint-Petersburg State National Research University of the Informational Technologies, Mechanics and Optics,

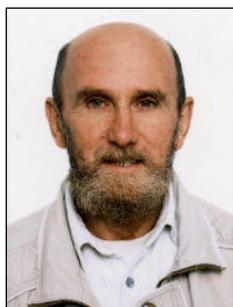
² Institute of Automation and Electrometry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

Abstract

The theoretical and experimental study of the laser thermochemical writing of diffractive microstructures at the multibeam and multipass regime were presented. The diffractive structures with the spacing of 1.6 microns on thin chromium film were received using laser writing beam divided for 5 parts by Dammann grating. Exposure of the chromium film was carried out at 5 runs to improve the accuracy of recording. Estimation method of the temperature fields and oxide distribution in film was proposed. Carried out calculations shown that despite the mutual influence of temperature fields from different beams, the recording resolution is high enough for obtaining the micron-scale structures. Using the multipass regime as shown increases the contrast and precision of tracks while the high resolution saves.

Key words: laser-induced oxidation, diffractive optical elements, metallic films.

Сведения об авторах



Вейко Вадим Павлович. Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой лазерных технологий и экологического приборостроения Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики. Список основных научных трудов содержит более 300 наименований, в т.ч. 7 монографий и 31 авторских свидетельств и патентов. Научные интересы: лазерные микро- и нанотехнологии, взаимодействие излучения с веществом, лазерная очистка поверхностей, лазерные технологии в медицине, лазерная термохимия.

E-mail: veiko@lastech.ifmo.ru.

Vadim Pavlovich Veiko. Dr. Sci. Tech., prof., head of Laser Technologies and Applied Ecology department of St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics. List of his scientific achievements consists of more than 300 names, including 7 monographs and 31 inventions and patents. Research interests: laser micro- and nanotechnologies, interaction of radiation with matter, laser cleaning of surfaces, laser technologies in medicine, laser thermochemistry.



Синёв Дмитрий Андреевич. Магистр техники и технологий, аспирант, инженер кафедры лазерных технологий и экологического приборостроения Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики. Научные интересы: лазерные технологии, лазерная термохимия.

E-mail: sinev_dm@mail.ru.

Dmitriy Andreevich Sinev. Master of techniques and technologies, postgraduate student, engineer of Laser Technologies and Applied Ecology department of St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics. Research interests: laser technologies, laser thermochemistry.



Шахно Елена Аркадьевна. Доктор технических наук, доцент, профессор кафедры лазерных технологий и экологического приборостроения Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики. Автор около 80 работ и изобретений. Научные интересы: лазерные технологии, теоретическое моделирование взаимодействия излучения с веществом, лазерная очистка поверхностей, лазерные технологии в медицине, лазерная термохимия.

E-mail: elena.shakhno@rbcmil.ru.

Elena Arkadjevna Shakhno. Dr. Sci. Tech., prof. of Laser Technologies and Applied Ecology department of St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics. Author of about 80 scientific papers and inventions. Research interests: laser and technologies, theoretical modeling the interaction of radiation with matter, laser cleaning of surfaces, laser technologies in medicine, laser thermochemistry.



Полещук Александр Григорьевич, доктор технических наук, работает в ИАиЭ СО РАН с 1973 г. В 1997 был избран на должность заведующего лабораторией лазерных технологий, затем – лабораторией дифракционной оптики. Полещук А.Г. является автором более 220 научных работ, опубликованных в отечественных и зарубежных журналах и сборниках, в том числе 1 монографии и более 30 авторских свидетельств и патентов на изобретения. Область научных интересов: компьютерная и дифракционная оптика, лазерная интерферометрия, оптические измерения, лазерные технологии.

E-mail: poleshchuk@iae.nsk.su.

Alexandr Grigorievich Poleshchuk, Dr. Sci. Tech., Since 1973 currently he works in Institute of Automation & Electrometry Siberian Branch of Russian Academy of Sciences (IAE SB RAS). He has been selected on a post of the head of laboratory of diffractive optics at IAE SB RAS in 1997. He is co-author of more than 220 scientific papers, 1 monographs, more than 30 inventions and patents. His research interests are computer and diffractive optics, laser interferometry, optical metrology, laser technology.



Саметов Александр Рашитович, 1957 года рождения, в 1979 году окончил Новосибирский государственный университет по специальности «Физика», работает ведущим инженером-оптиком в ИАиЭ СО РАН в лаборатории дифракционной оптики. Область научных интересов: компьютерная и дифракционная оптика, разработка оптических систем, лазерные технологии.

Alexandr Rashitovich Sametov (b. 1957) graduated from Novosibirsk State University, majoring in Physics. He is principal engineer – optician of laboratory of diffractive optics at Institute of Automation & Electrometry Siberian Branch of Russian Academy of Sciences. He is co-author of 20 scientific papers. His current research interests include computer and diffractive optics, optical system design, laser technologies.



Седухин Андрей Георгиевич. Кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института автоматизации и электрометрии Сибирского отделения РАН. Научные интересы: волновая оптика, синтез структуры и численное моделирование волновых полей на базе систем с компьютерно-генерированными дифракционными оптическими элементами.

E-mail: sedukhin@iae.nsk.su.

Andrey Georgievich Sedukhin. Cand. of tech. Sci., Senior Research Scientist of the Institute of Automation and Electrometry of the Siberian Branch of Russian Academy of Sciences. Research interests: Wave optics, synthesizing the structure and numerical modeling of the wave fields on the basis of systems with computer-generated diffractive optical elements.

Поступила в редакцию 10 мая 2012 г.