

А. П. Золоторенко^{1,2}✉, В. П. Корольков², А. Р. Саметов², В. В. Черкашин²

Коррекция микроструктуры скрещенных дифракционных решёток при термохимической лазерной записи

¹Новосибирский национальный исследовательский государственный университет,
г. Новосибирск, Российская Федерация

²Институт автоматики и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: a.zolotorenko@g.nsu.ru

Аннотация. Дифракционные оптические элементы (ДОЭ) представляют собой двумерные искусственно созданные структуры, модифицирующие фазу и амплитуду электромагнитной волны в каждой точке поверхности, что позволяет формировать световые пучки с заданными пространственными характеристиками. При формировании ДОЭ методом термохимической лазерной записи возникают термохимические искажения, проявляющиеся в деформации границ экспонируемых областей из-за неоднородного теплового воздействия лазерным пучком. В рамках исследования установлены корреляционные зависимости между величиной сдвига границ и мощностью лазерного пучка. На основе полученных данных разработан и экспериментально апробирован метод коррекции искажений, сочетающий компенсацию сдвигов границ и введение «микровыступов». Экспериментально продемонстрировано повышение однородности дифракционных порядков даммановских решёток, достигаемое за счёт предложенной методики, что подтверждает её эффективность для создания высокоточных ДОЭ.

Ключевые слова: Дифракционно оптический элемент (ДОЭ), термохимическая лазерная запись, коррекция скрещенных дифракционных решёток

A. P. Zolotorenko^{1,2}✉, V. P. Korolkov², A. R. Sametov², V. V. Cherkashin²

Correction of the microstructure of crossed diffraction gratings during thermochemical laser recording

¹Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

²Institute of Automation and Electrometry of SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: a.zolotorenko@g.nsu.ru

Abstract. Diffractive optical elements (DOEs) are artificially engineered two-dimensional structures designed to modulate the phase and amplitude of an electromagnetic wave at each point across their surface, enabling the generation of light beams with predefined spatial characteristics. During the fabrication of DOEs via thermochemical laser writing, thermochemical distortions emerge, manifesting as deformations at the boundaries of exposed regions due to non-uniform thermal effects induced by the laser beam. This study establishes correlational relationships between the magnitude of boundary shifts and the laser beam power. Based on these findings, a distortion correction method has been developed and experimentally validated, combining boundary shift compensation with the introduction of «microprotrusions». Experimental results demonstrate enhanced uniformity in the diffraction orders of Damman gratings achieved through the proposed methodology, confirming its efficacy for the fabrication of high-precision DOEs.

Keywords: Diffractive Optical Element (DOE), Thermochemical Laser Writing, Correction of Crossed Diffraction Gratings

Введение

Дифракционные оптические элементы (ДОЭ) представляют собой искусственные двумерные структуры, способные управлять амплитудой и фазой электромагнитного излучения, формируя световые пучки с заданными характеристиками. Их применение охватывает ключевые области современной оптики: интерферометрию, голографию, адаптивные системы и лазерные технологии, где точность микрорельефа ДОЭ напрямую определяет качество экспериментальных данных и функциональность оптико-электронных устройств. Несмотря на широкий спектр методов изготовления ДОЭ, включая лазерное травление, фотолитографию и жидкостное травление, особый интерес вызывает технология прямой лазерной термохимической записи [1-3]. Этот метод основан на локальном нагреве тонкопленочных материалов (например, хрома) [4] лазерным излучением, что приводит к формированию скрытых изображений, преобразуемых в микрорельеф посредством селективного травления [5]. Однако его эффективность ограничена тепловыми искажениями, возникающими из-за нестационарности температурных полей и кинетики химических реакций в процессе записи.

Термохимические искажения [6,7] проявляются в деформациях границ экспонируемых областей, особенно выраженных в зонах включения и выключения лазерного пучка. Эти артефакты связаны с инерционностью нагрева и охлаждения материала, а также с неравномерным распределением энергии в тонкой пленке хрома, что приводит к отклонению геометрии микроструктур от проектных параметров. Последствиями таких искажений являются снижение дифракционной эффективности и уменьшение однородности дифракционных порядков решётки.

Для оптимизации термохимической записи известен ряд подходов [8-10]. В рамках данного исследования для минимизации угловых искажений разработана методика, основанная на коррекции границ экспонируемых зон и формировании «микровыступов» в области угла элемента решётки. Предложенный подход направлен на компенсацию паразитных деформаций за счет локальной модификации топологии поверхности, что обеспечивает повышение точности формирования рельефа скрещенных решёток.

Основная цель настоящей работы заключалась в разработке и апробации метода коррекции для прямой лазерной записи скрещенных решёток [11], в частности даммановского типа [12-14], направленного на улучшение ключевых характеристик, таких как дифракционная эффективность и пространственная однородность дифракционных пучков. При создании дифракционных оптических элементов использовалась круговая лазерная записывающая система (КЛЗС) CLWS-300IAE. В качестве материала для формирования решёток применялись тонкие хромовые плёнки, обрабатываемые по технологии термохимической лазерной записи.

Метод записи скрещенных решёток

Для создания дифракционных оптических элементов применяется круговая лазерная записывающая система [15,16]. КЛЗС предназначена для прямой лазерной записи амплитудных бинарных микроструктур произвольной геометрии на пленках хрома. Принцип работы КЛЗС состоит в формировании сфокусирован-

ным лучом лазера скрытых изображений в плёнке хрома или другого материала. Запись изображений осуществляется путем пошагового перемещения записывающего лазерного пучка, по радиусу непрерывно вращающейся подложки и синхронной с вращением модуляции мощности пучка под управлением компьютера. Длине волны записи 532 нм.

Экспериментальное исследование искажений

Для исследования корреляционных функций сдвигов границ элементов в зависимости от мощности записывающего пучка были проведены эксперименты с записью тестовых структур, представляющих собой треки с периодически изменяющимся в шахматном порядке периодом записи (рис. 1). Структура, состояла из 10-25 дуговых тестов, каждый из которых, состоял из 5 треков с шагом записи 0.5мкм. Данные структуры были записаны на различных радиусах подложки от 5 мм до 35 мм. Аналитическому изучению подверглись сдвиги граничных областей, локализованные в зонах переходов между структурными элементами.

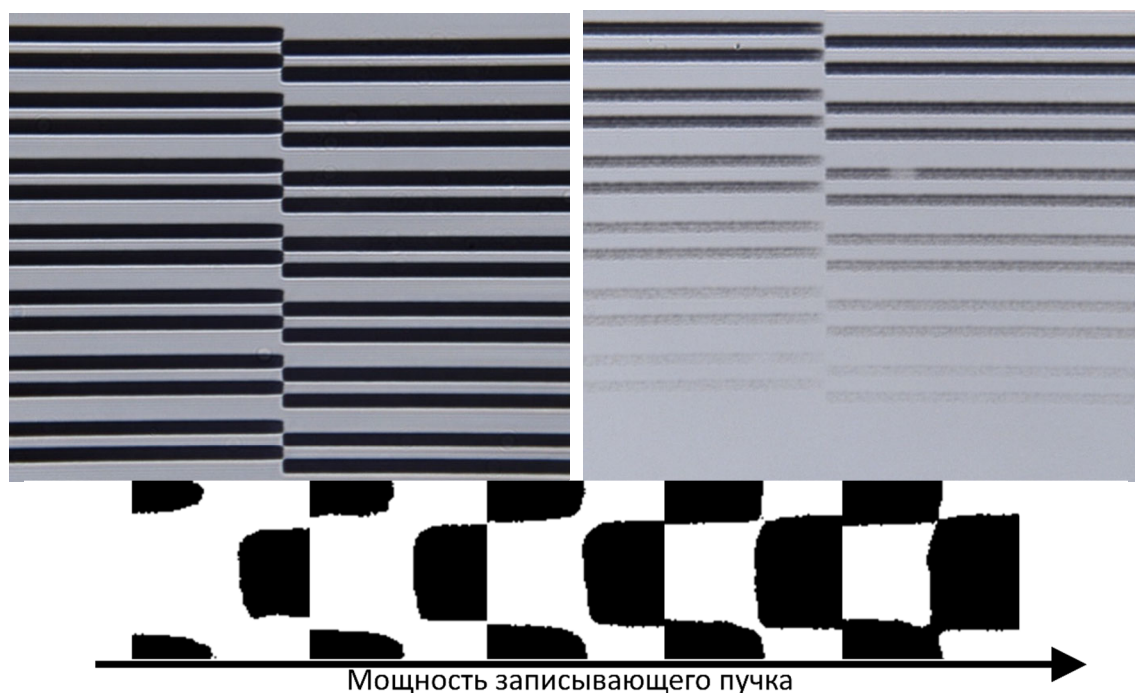


Рис. 1. Тестовых структур для анализа сдвигов границ

Наблюдаемые смещения продемонстрировали два типа пространственных искажений (рис. 2): Сдвиг по направлению сканирования, обусловленный несовпадением точек начала и завершения записи трека, что согласуется с предсказаниями теоретической модели процесса и радиальный сдвиг, связанный с пространственной асимметрией энергетического воздействия пучка, проявляющейся в пулевидной форме трека записи.

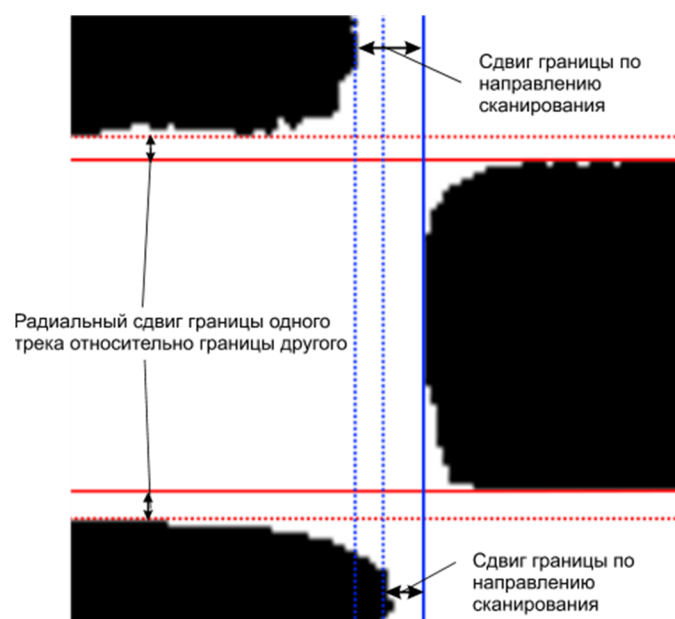


Рис. 2. Сдвиги границ тестовой структуры в начале и конце периода записи

Анализ экспериментальных данных выявили характер корреляций между сдвигами и мощностью: экспоненциальный тренд для смещений по направлению сканирования и линейная корреляция для радиальных смещений границ. (рис. 3).

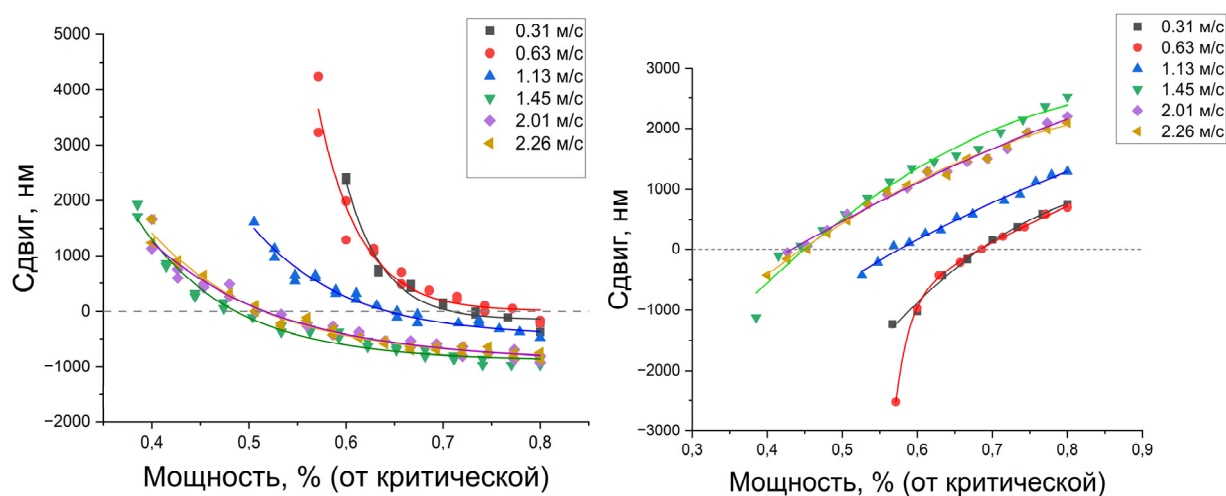


Рис. 3. Зависимости сдвигов границ по направлению сканирования и радиальных от мощности записывающего пучка

Для нахождения зависимости коэффициента соответствия от мощности для различных скоростей сканирования была записана тестовая структура (рис. 4).

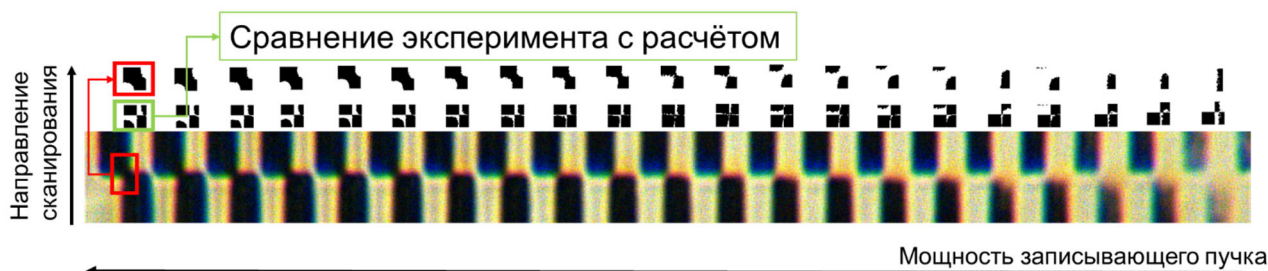


Рис. 4. Тестовая структура для анализа коэффициента соответствия

Коэффициент соответствия – это отношение количество совпадающих пикселей между экспериментальным образцом и теоретической расчётной структурой на общее количество пикселей рассматриваемого участка:

$$f = \frac{N}{S} \quad (5)$$

где f – коэффициент соответствия, S – количество совпадающих пикселей N – общее количество пикселей.

Проведённый анализ зависимости коэффициента соответствия от мощности сканирования (рис. 5) позволяет сделать вывод о том, что в области повышенных скоростей отсутствует выделенный диапазон мощности, способствующий качественному формированию ДОЭ. Результаты эксперимента указывают на то, что при увеличении скорости сканирования невозможно подобрать оптимальную мощность для записи, что негативно сказывается на качестве получаемых элементов. В связи с этим возникает необходимость применения методов коррекции для улучшения геометрии, что может способствовать достижению требуемых характеристик и повышению стабильности процессов формирования ДОЭ.

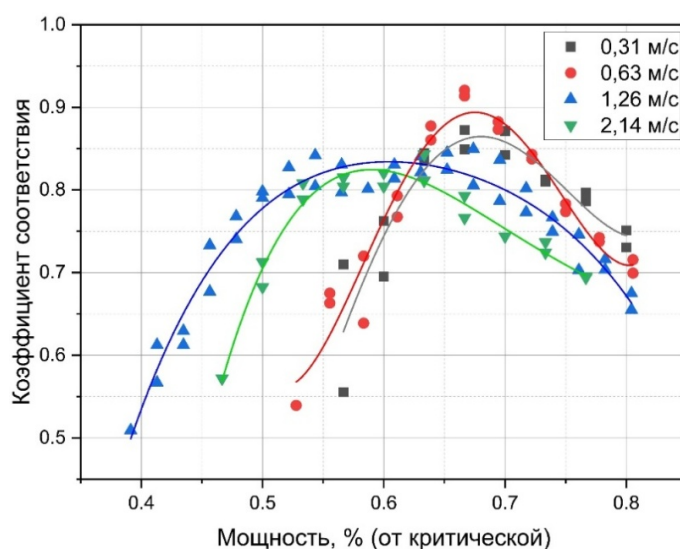


Рис. 5. Зависимость коэффициента соответствия от мощности сканирования

Компенсация искажения углов

Компенсация искажение границ можно реализовать с помощью их смещения в рамках создаваемых проектов для записи [17,18]. Использование данного метода позволит скомпенсировать искажение геометрии, не изменяя условия и характеристики записи, такие как мощность записывающего пучка и скорость сканирования.

Для компенсации искажений углов было предложено создать «микровыступы» на углах элемента. «Микровыступом» в данной работе обозначены дополнительные элементы, расположенные в угловых точках основного элемента, позволяющие скомпенсировать угловые искажения. Размер «микровыступа» зависит от задаваемой коррекции границ и для экспериментальной решётки составляет 200 нм. Однако из-за ограничений установки, заключающиеся в том, что лазерная запись начинается от трёх треков, было решено увеличить размеры квадрата до 400 нм. Далее он был утоплен в элемент на глубину 200 нм для сохранения изначального положения (рис. 6 а).

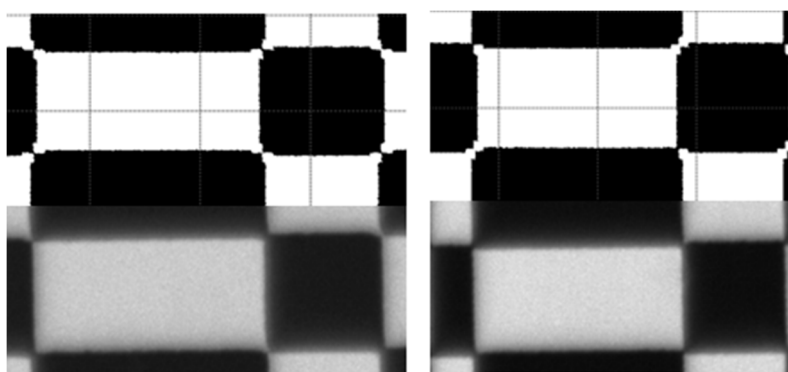


Рис. 6. Расчётный и записанный вид элемент скрещённой решётки а) с четырьмя «Микровыступами» и б) тремя «Микровыступами»

Добавление «микровыступа» позволило скомпенсировать угловые искажения и заострить углы. Однако, после записи тестовой решётки было выяснено, что по направлению записи «микровыступы» образуют перемычку (рис.7 б). Для устранения данного дефекта было предложено не создавать нижний «микровыступ» по направлению записи (рис. 6 б). Это позволило создать элемент с острым углом (рис. 7 с).

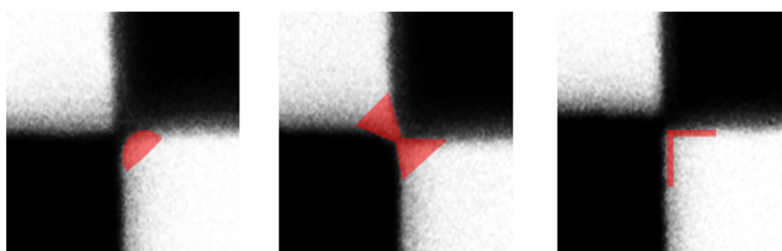


Рис. 7. Экспериментальное изображение элементов решётки а) без добавления «микровыступов», б) с четырьмя «микровыступами» и с) с тремя

Для подтверждения метода была проведена экспериментальная запись, в ходе которой выполнено лазерное формирование 34 образцов скрещенных дамановских решёток. Для каждого типа образцов были установлены различные параметры: наличие коррекции, наличие дополнительных «Микровыступов», наличие смещения «микровыступов» относительно угла элемента (рис. 8).

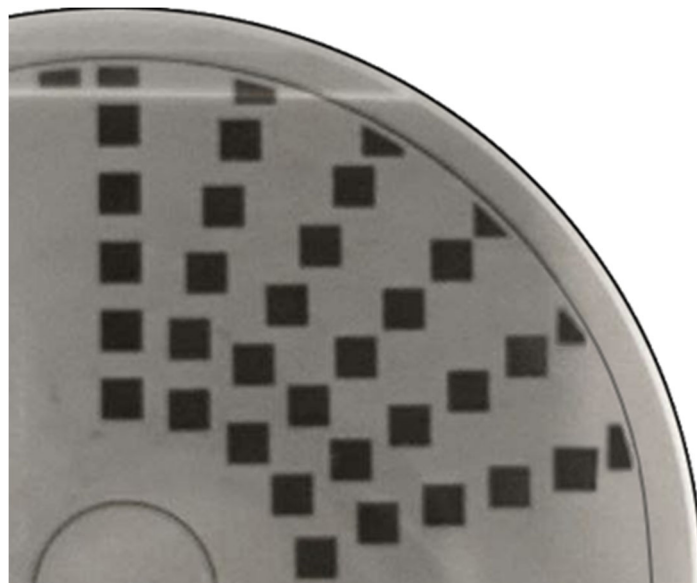


Рис. 8. Тестовая структура для апробирования метода коррекции

Результатом стало измерение среднеквадратичного отклонения дифракционной эффективности 48 порядков дифракции (СКО 48, исключая нулевой порядок) дамановской решётки (рис. 9) после реактивно-ионного травления микро-рельефа через хромовую маску [19]. Наименьшие средние значения СКО 48 продемонстрировали решётки с коррекцией границ на -200 нм, как без дополнительных микровыступов (обозначенные как -200), так и с тремя микровыступами (смещёнными на 50 нм относительно границы, обозначенные как sq3d50). Средние значения СКО 48 составили 8,35% и 8% соответственно для данных вариантов оптимизации. Эти значения на 2% ниже, чем у эталонных образцов без коррекции. Данный результат экспериментально подтверждает эффективность предложенного способа коррекции границ скрещенных дифракционных решёток с использованием «микровыступов».

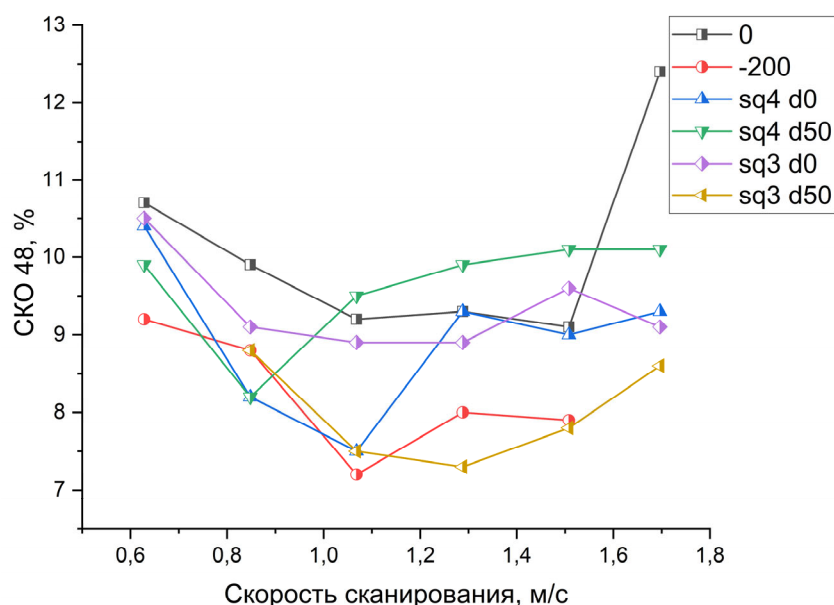


Рис. 9. Среднеквадратичное отклонение 48 дифракционных порядков при различных скоростях сканирования. 0 – структуры без коррекции; -200 – структуры с коррекцией границ без дополнительных «микровыступов»; sq4 d0 – структуры с коррекцией границ с 4 «микровыступами» и 0 сдвигом; sq4 d50 – структуры с коррекцией границ с 4 «микровыступами» и 50 нм сдвигом; sq3 d0 – структуры с коррекцией границ с 3 «микровыступами» и 0 сдвигом; sq3 d50 – структуры с коррекцией границ с 3 «микровыступами» и 50 нм сдвигом

Заключение

Таким образом, в рамках настоящего исследования продемонстрировано влияние термохимических искажений, возникающих в процессе формирования скрещенных дифракционных решёток, а также предложена методика их компенсации. Реализация данной методики способствует улучшению функциональных параметров создаваемых ДОО, что повышает их потенциал применения в высокоточных оптических системах.

Проведенное исследование говорит о проблеме необходимости улучшения характеристик и функциональности КЛЗС, поставленной ранее [20].

Благодарности

Исследование финансировалось за счет субсидий на финансовое обеспечение государственного задания (государственный регистрационный номер 124041700107-9). В исследовании использовалось оборудование ЦКП "Спектроскопия и оптика" ИАиЭ СО РАН и ЦКП ВТАН НГУ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Коронкевич В. П., Полещук А. Г., Чурин Е. Г., Юрлов Ю. И. Лазерная термохимическая технология синтеза дифракционных оптических элементов на пленках хрома. Квантовая электроника, –1985 т. 12, № 4 – с. 755-761.
2. Углов А. А. Моделирование теплофизических процессов импульсного лазерного воздействия на металлы. – Наука, 1991. – 286 с.

3. В.П.Кириянов, В.Г. Никитин, «К вопросу о механизме записи изображений в пленках хрома», Автометрия. 2004. – Т. 40, №2. –С. 59-68.
- 4.Рыбакова В. Ю., Павпертов Д. А. Исследование тонкой пленки хрома, нанесенной на подложку методом магнетронного напыления //Ресурсосбережение и экология строительных материалов, изделий и конструкций. – 2018. – С. 325-327.
- 5.Коронкевич В. П. и др. Селективное травление экспонированных лазером тонких пленок хрома //Письма в журнал технической физики. – 1985. – Т. 11. – №. 3. – С. 144-148.
6. Агафонов А. Н., Моисеев О. Ю., Корлюков А. А. Анализ зависимости разрешающей способности технологии локального термохимического окисления от параметров структуры светочувствительной пленки хрома //Компьютерная оптика. – 2010. – Т. 34. – №. 1. – С. 101-108.
7. Вейко В. П. и др. Исследование пространственного разрешения лазерной термохимической технологии записи дифракционных микроструктур //Квантовая электроника. – 2011. – Т. 41. – №. 7. – С. 631-636.
8. Полещук А. Г. и др. Методы минимизации ошибок прямой лазерной записи дифракционных оптических элементов //Автометрия. – 2002. – Т. 38. – №. 3. – С. 3-19.
9. Cherkashin V. V. et al. Processing parameter optimization for thermochemical writing of DOEs on chromium films //Diffractive and Holographic Device Technologies and Applications IV. – SPIE, 1997. – Т. 3010. – С. 168-179.
10. Xie N., Jones D., Lopez G. Comprehensive modeling of the lithographic errors in laser direct write //Journal of Vacuum Science & Technology B. – 2019. – Т. 37. – №. 6.
- 11.Сергеев С. А., Мешалкин А. Ю., Йову М. С. Дифракционные структуры, сформированные двумя скрещенными наложенными дифракционными решетками //Электронная обработка материалов. – 2020. – Т. 56. – №. 6. – С. 51-60.
12. Jahns J. et al. Dammann gratings for laser beam shaping //Optical Engineering. – 1989. – Т. 28. – №. 12. – С. 1267-1275.
- 13.Lin J. C. Department of Electrical Engineering and Computer Science //Advances in Electromagnetic Fields in Living Systems. – 1994. – Т. 2. – С. 129.
- 14.Krackhardt U., Streibl N. Design of Dammann-gratings for array generation //Optics communications. – 1989. – Т. 74. – №. 1-2. – С. 31-36.
15. Poleshchuk A.G., Churin E.G., Koronkevich V.P., Korolkov V.P., Polar coordinate laser pattern generator for fabrication of diffractive optical elements with arbitrary structure // Applied Optics. – 1999. – V.38. – N 8. – Pp. 1295–1301.
16. Вейко В.П., Корольков В.П., Полещук А.Г., Синев Д.А., Шахно Е.А. Лазерные технологии в микрооптике. Ч. I. Изготовление дифракционных оптических элементов и фотошаблонов с амплитудным пропусканием // Автометрия. 2017. Т. 53, № 5. С. 66–77.
17. Korolkov, V. P., Sedukhin, A. G., Kuts, R. I., Cherkashin, V. V., Golubtsov, S. K., Malyshev, A. I., & Belousov, D. A. (2022). Analyzing the tolerances on direct laser writing of two-dimensional Dammann gratings and performing the software correction of writing modes. 12318, 123182G.
18. Корольков В.П., Седухин А.Г., Куц Р.И., Саметов А.Р., Малышев А.И., Черкашин В.В. «Дифрактометрический контроль и коррекция структуры компьютерно-синтезированных разветвляющих решеток Даммана на этапе их изготовления» Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2022. Междунар. науч. конгр., Новосибирск, 22 – 23 сентября 2022 г. Национальная конференция с международным участием «СибОптика-2022. Актуальные вопросы высокотехнологичных отраслей»: сб. материалов в 8 т. Новосибирск: СГГА, 2022. – 165 с.: – Т. 8. – № 1. – С. 9-16.
19. Корольков В.П., Малышев А.И., Голубцов С.К., Куц Р.И., Саметов А.Р. Лазерные и вакуумно-плазменные технологии микроструктурирования для задач оптического приборостроения // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2023. – Т. 8, № 2. – С. 3–8.
20. V.N. Khomutov, R.V. Shimansky, R.K. Nasyrov, V.P. Korolkov, Principles of operation and prospects for the development of laser lithographic systems for the synthesis of optical elements / // Proceedings of SPIE. – 2021. – Vol. 11875. – P. 118750O.

© А. П. Золоторенко, В. П. Корольков, А. Р. Саметов, В. В. Черкашин, 2025