

Анализ допусков при формировании двумерных скрещенных решеток при лазерной литографии и программная коррекция режимов записи

В. П. Корольков¹, А. Г. Седухин¹, Р. И. Куц^{1,2}, Д. А. Белоусов¹, В. В. Черкашин¹, С. К. Голубцов¹,
А. Р. Саметов¹, А. И. Малышев¹, А. Е. Качкин¹

¹ Институт автоматки и электрометрии СО РАН, Новосибирск, Россия

² Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

Одно- и двумерные решетки с компьютерно-генерируемой бинарной фазовой структурой в настоящее время широко используются во многих приложениях для разделения лазерного луча на несколько порядков дифракции. На характеристики таких дифракционных оптических элементов большое влияние оказывает искажение их топологии при изготовлении. Были проанализированы допуски на формирование бинарно-фазовых решеток, формирующих матрицу дифракционных порядков 7×7 и со структурой, разделяемой на X- и Y-составляющие. Исследованы ошибки топологии прямолинейных микроструктур при прямой лазерной записи на круговой лазерной записывающей системе. Для компенсации искажений, возникающих из-за особенностей процесса термохимического окисления на границах микроэлементов, предложена упрощенная методика программной коррекции размеров микроэлементов. Определены допуски на лазерную запись решеток, обеспечивающие получение решеток с среднеквадратичной ошибкой отклонения интенсивности полезных порядков дифракции менее 8%.

Ключевые слова: Лазерная литография, Скрещенные дифракционные решетки, среднеквадратичная ошибка интенсивности порядков, корректировка размеров микроэлементов.

Цитирование: Корольков, В. П. Анализ допусков при формировании двумерных скрещенных решеток при лазерной литографии и программная коррекция режимов записи / В. П. Корольков, А. Г. Седухин, Р. И. Куц, Д. А. Белоусов, В. В. Черкашин, С. К. Голубцов, А. Р. Саметов, А. И. Малышев, А. Е. Качкин // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 201–206.

Введение

В настоящее время, в технике оптического приборостроения и экспериментальных научных исследованиях широкое применение находят решетки Даммана [1, 2]. В подавляющем большинстве приложений, основной функцией таких решеток является высокоэффективное и помехоустойчивое одномерное либо двумерное расщепление лазерного пучка на пространственно-изолированные регулярные массивы пучков с равными интенсивностями. Стандартные, наиболее распространенные, формы рассматриваемых решеток имеют вид планарных одномерных либо двумерных скрещенных дифракционных решеток со специально-рассчитанными псевдoreгулярными бинарно-фазовыми профилями их структуры в главных поперечных сечениях. На практике, данные структуры получают с помощью технологий электронно-лучевой либо лазерной сканирующей литографии.

Основными техническими параметрами этих решеток являются общая световая эффективность в полезных центральных порядках дифракции и разброс интенсивностей полезных порядков, который обычно определяется как отношение максимальной интенсивности в полезных порядках к минимальной интенсивности либо как среднеквадратическое отклонение (СКО) данных порядков. Многолетний опыт авторов данной работы по расчету и практическому изготовлению решеток рассматриваемого вида для оптического и ближнего инфракрасного диапазонов длин волн [3–4] показывает, что основным «камнем преткновения» при компьютерном лазерно-литографическом изготовлении решеток является удовлетворение жестким допускам на точность воспроизведения структуры решеток, как по их поверхностной планарной топологии, так и по глубине фазового профиля. Несмотря на совершенствование современных технологий изготовления решеток, реализуемые на практике структуры коммерчески-доступных решеток и характеристики этих решеток [7] все еще не являются достаточно близкими приближениями к расчетным структурам и характеристикам идеальным решеток. Также, по технологическим причинам, не всегда представляется возможным само изготовление заказных решеток с желаемыми параметрами. В этой связи, совершенствование лазерных технологий записи решеток и поиск новых улучшенных режимов их записи представляется достаточно востребованным. В данной работе рассматриваются ошибки топологии микроэлементов скрещенной решетки Даммана, возникающих при прямой лазерной записи на тонких пленках хрома методом термохимического окисления.

1. Искажения топологии структур

Термохимическая лазерная запись скрытого изображения микроструктур на пленке хрома осуществлялась на установке CLWS-300IAE [8] с длиной волны записывающего лазера 532 нм и диаметром пятна (FWHM) ~0,7 мкм. Проявление скрытого изображения осуществлялось с помощью жидкостного селективного травителя хрома на основе красной кровяной соли. Время проявления, влияющее на итоговую скважность хромовой маски, контролировалось методом регистрации нулевого дифракционного порядка от встроенной тестовой одномерной бинарной решетки.

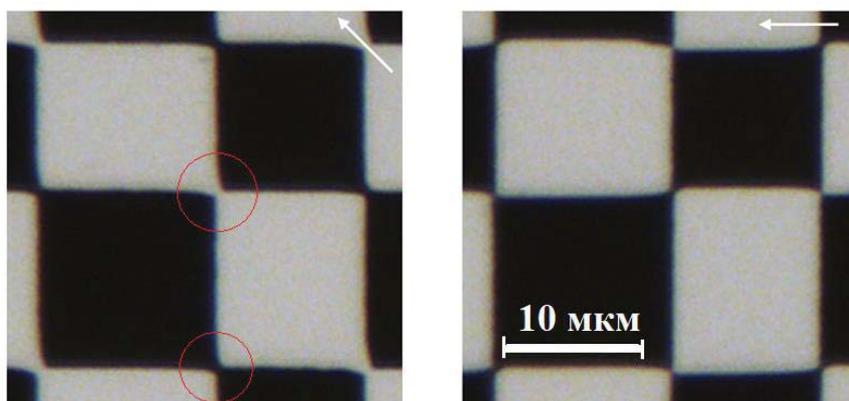


Рис. 1. Микрофотография дифракционных зон решетки Даммана

На первом этапе эксперимента, после проявления первого образца с решеткой Даммана, было выявлено наличие искажений топологии микроэлементов решетки. Эти искажения зависят от угла входа лазерного трека в границу микроэлементов и возникают из-за термоэффектов при лазерной записи на угловых стыках дифракционных зон. Пример микрофотографий дифракционных зон показаны на рис. 1. Красными окружностями показаны искаженные участки, стрелками – направления хода записывающего лазерного пучка. Также было определено, что данные искажения эффективно уширяют геометрические границы дифракционных зон. Исходя из этого была предложена коррекция формы, представляющая собой равномерное сжатие размеров микроэлементов.

2. Коррекция размеров структуры

Следующим этапом была проведена лазерная запись серии решеток Даммана с корректировкой каждой границы микроэлемента 0-0,5 мкм с шагом 0,1 мкм в сторону уменьшения размеров (суммарно линейные размеры каждого микроэлемента уменьшались до 1 мкм). Для каждой величины корректировки были записаны две дифракционные решетки — под углами 45° и 90° к ходу записывающего лазерного пучка, как два граничных случая при записи скрещенной структуры на установке лазерной записи с полярной системой координат. Время проявления, как уже было сказано, контролировалось путем достижения определенного заранее выбранного уровня интенсивности нулевого порядка тестовой одномерной бинарной решетки.

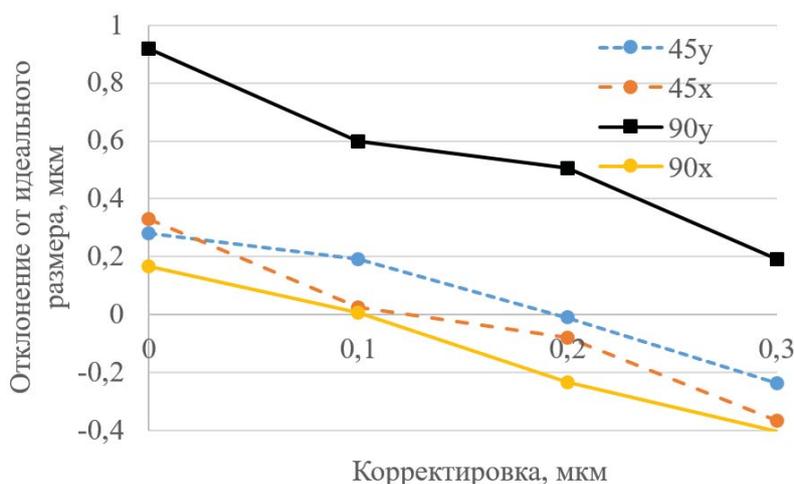


Рис. 2. Отклонение поперечных размеров микроэлементов

На рисунке 2 показаны графики зависимости отклонений поперечных размеров элементов по двум направлениям (X – вдоль траектории лазерного луча, Y – перпендикулярно траектории) и для двух углов вхождения 45° и 90°. Из графиков видно, что при отсутствии корректировки размеры микроэлементов увеличены на 0,2-0,3 мкм от расчетного значения. Кроме того, наибольшее отклонение (~0,9 мкм) от расчетного значения имеет поперечный размер структур при записи под углом 90°. На этот размер влияет эффект теплового уширения треков.

Чтобы приблизить топологию реально получаемых микроэлементов к расчетной топологии решетки Даммана, необходимо вносить так называемую динамическую коррекцию при записи микроэлементов. Такая оптимизация может представлять собой корректировки, как размера микроэлементов, так и их формы. Кроме того, данная коррекция будет учитывать угол и радиус (скорость) записи. Предположительно, коррекция должна представлять собой изменение мощности записи в начале каждого трека для более быстрой активации процесса термохимического окисления. Реализация данной коррекции требует большого объема памяти вычислительной части лазерной записывающей системы и дальнейших научных исследований по подбору параметров корректировки. По этой причине в нашем исследовании была использована только вышеописанная корректировка размеров микроэлементов.

3. Получение оптимального размера корректировки

Для определения оптимальной корректировки размера микроэлементов были получены данные СКО по всем пучкам матрицы 7x7, создаваемым дифракционной решеткой, в зависимости от величины корректировки. Данные зависимости представлены на графике 3а.

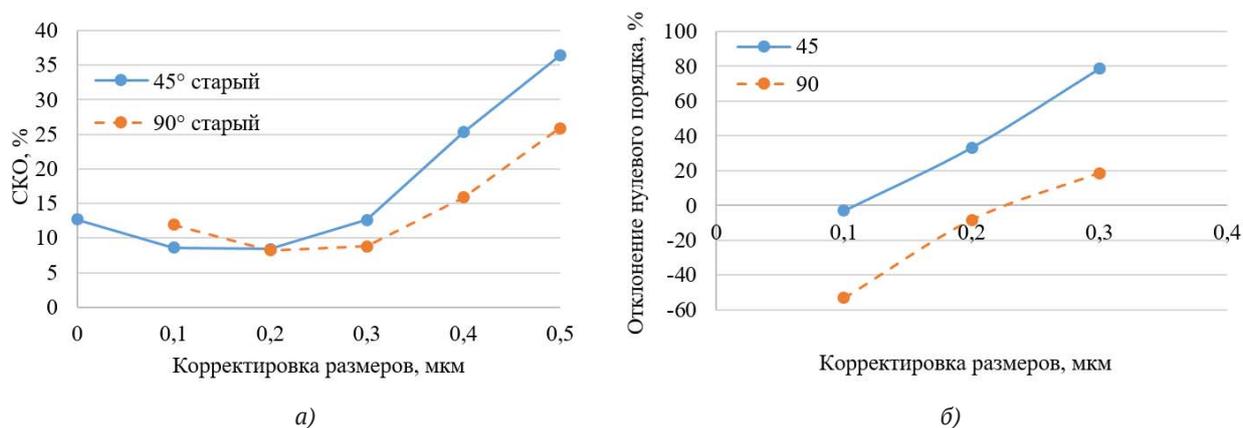


Рис. 3. Зависимости СКО от величины корректировки размера: а) СКО главных дифракционных порядков для углов записи 45° и 90°; б) отклонения нулевого порядка.

Видно, что зависимости для углов вхождения лазерного трека в границы микроэлементов, как 45° так и 90°, имеют минимумы. Смещение этих минимумов объясняется тем, что при угле записи 90°, при котором треки становятся перпендикулярными одним границам микроэлемента и параллельными другим, эффективный размер микроэлемента, как уже было сказано, увеличивается за счет температурного уширения трека в поперечном направлении. При угле 45° такого не наблюдается, т. к. две смежных границы сформированной маски дифракционной зоны состоят из точек включения лазерного экспонирования, в которых, в свою очередь, происходит задержка формирования оксидного следа вследствие конечного постепенного нагревания пленки хрома под воздействием излучения. Основной вклад в зависимости СКО вносит отклонение интенсивности нулевого порядка от среднего. Данные отклонения интенсивности нулевого порядка в зависимости от величины корректировки размеров представлены на рис. 3б.

Полученные зависимости СКО от корректировки позволяют определить оптимальную величину корректировки, равную $-0,2$ мкм с каждой стороны микроэлемента. Таким образом, при данной корректировке и при повторяемом контроле времени проявления последующих элементов можно достигнуть СКО всех главных дифракционных порядков решетки Даммана, формирующей матрицу пучков 7×7 , на уровне ниже 8%.

Заключение

При прямой лазерной записи скрещенных дифракционных решеток на круговых лазерных записывающих системах необходимо учитывать искажения топологии структур, возникающие из-за особенностей процесса термохимического окисления. Для эффективного устранения искажений топологии необходимо реализовать программные коррекции, зависящие от угла и скорости записи, что требует больших вычислительных мощностей записывающей установки. Была предложена и реализована программная корректировка, представляющая собой равномерное сокращение размеров микроэлементов. При данной конфигурации параметров лазерной записи было получено оптимальное значение корректировки, равное $-0,2$ мкм с каждой стороны микроэлемента. Таким образом, при данной корректировке и при повторяемом контроле времени проявления последующих элементов можно достигнуть СКО всех главных дифракционных порядков решетки Даммана, формирующей матрицу пучков 7×7 , на уровне ниже 8%.

Благодарность

Работа выполнена за счет средств субсидии на финансовую поддержку государственного задания (№ гос. регистрации 121041500060-2). В исследовании использовалось оборудование ЦКП «Спектроскопия и оптика» ИАиЭ СО РАН. Авторы благодарят ЦКП ВТАН НГУ за проведение измерений на научном оборудовании.

Список источников

- [1] **Dammann, H.** High-efficiency in-line multiple imaging by means of multiple phase holograms / H. Dammann, K. Görtler. //Optics communications. – 1971. – Vol. 3. – №. 5. – P. 312-315
- [2] **Dammann, H.** Coherent optical generation and inspection of two-dimensional periodic structures / H. Dammann, E. Klotz //Optica Acta: International Journal of Optics. – 1977. – Vol. 24. – №. 4. – P. 505-515
- [3] **Bessmeltsev V. P.** et al. Compact absolute shaft angular encoder based on diffractive optical elements //Seventh International Symposium on Laser Metrology Applied to Science, Industry, and Everyday Life. – SPIE, 2002. – Vol. 4900. – P. 941-945
- [4] **А.Г. Седухин** и С.А. Бреднихин, Труды 7-ой Междунар. конф. «Прикладная оптика – 2006». – 2006. – № 3. – P. 253-257
- [5] **Полещук, А. Г.** Многопучковая лазерная запись дифракционных оптических элементов / А. Г. Полещук, А. Р. Саметов, А. Г. Седухин //Автоматрия. – 2012. – Т. 48. – №. 4. – С. 3-11
- [6] **Вейко, В. П.** Исследование особенностей многопучковой лазерной термохимической записи дифракционных микроструктур / В. П. Вейко, Д. А. Синёв, Е. А. Шахно, А. Г. Полещук, А. Р. Саметов, А. Г. Седухин // Компьютерная оптика. – 2012. – Т.36, №4. – С.562-571
- [7] <https://www.holoor.co.il/product/gratings/>
- [8] **Poleshchuk A. G.** et al. Polar coordinate laser pattern generator for fabrication of diffractive optical elements with arbitrary structure //Applied Optics. – 1999. – Т. 38. – №. 8. – С. 1295-1301.

Analysis of tolerances in the formation of two-dimensional crossed gratings in laser lithography and software correction of writing modes

V. P. Korolkov¹, A. G. Sedukhin¹, R. I. Kuts^{1,2}, D. A. Belousov¹, V. V. Cherkashin¹, S. K. Golubtsov¹, A. R. Sametov¹, A. I. Malyshev, A. E. Kachkin¹

¹ Institute of Automation and Electromertry SB RAS, Novosibirsk, Russia

² Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

One- and two-dimensional gratings with a computer-generated binary phase structure are currently widely used in many applications for separating a laser beam into several diffraction orders. The characteristics of such diffractive optical elements are greatly affected by the distortion of their topology during manufacture. The tolerances for the formation of binary-phase gratings that form a matrix of diffraction orders 7×7 and with a structure divided into X- and Y-components were analyzed. The topology errors of rectilinear microstructures are studied during direct laser writing on a circular laser writing system. To compensate for distortions arising from the peculiarities of the process of thermochemical oxidation at the boundary of microelements, a method for programmatic correction of microelement sizes is proposed. The tolerances for laser writing of gratings are determined, which ensure the production of gratings with a root-mean-square error in the deviation of the intensity of useful diffraction orders of less than 8%.

Keywords: Laser lithography, Crossed diffractive gratings, RMS error of order intensity, Microelement size correction.