

Анализ погрешностей и контроль топологии двумерных разветвляющих решеток при их компьютерном синтезе

В. П. Корольков¹, А. Г. Седухин^{1}, Р. И. Куц¹, С. К. Голубцов¹,
А. И. Малышев¹, В. В. Черкашин¹*

¹ Институт автоматики и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск,
Российская Федерация
* e-mail: sedukhin@iae.nsk.su

Аннотация. Предложен и исследован алгоритм коррекции параметров прямой лазерной записи топологических структур двумерных дифракционных разветвляющих решеток на лазерно-литографической установке DWL66+, работающей в прямоугольной системе координат. В качестве регистрирующих материалов применялись тонкие пленки фоторезиста, нанесенного на тонкую пленку хрома, напыленного на кварцевой подложке. Необходимые бинарно-фазовые структуры получались при последующем ионно-плазменном травлении записанных на установке амплитудных масок, протравленных через рисунок в резисте. Минимальный размер бинарных зон записываемых структур составлял 1500×1500 нм. Установлено, что для получения стабильности воспроизведения синтезируемых структур и приближения данных структур к расчетным, целесообразно использовать режим с частичным переэкспонированием фоторезиста и коррекцией положения переходных границ экспонируемых зон. Указанная коррекция положения переходных границ экспериментально реализована программным путем, с модификацией топологии записываемых структур и с экспериментальным выявлением оптимальной топологии дифракционных разветвляющих решеток по их отклику, с максимизацией эффективности в полезных порядках дифракции и минимизацией среднеквадратического отклонения между максимумами интенсивности в полезных порядках. С учетом размеров сфокусированного пятна (порядка 550 мкм), а также использованных регистрирующих материалов и режима записи с переэкспонированием фоторезиста, установлено, что оптимальная коррекция смещения границ экспонируемых зон составляет 200 нм, со смещением границ к центрам (внутри) зон.

Ключевые слова: прямая лазерная запись, фоторезисты, пленки хрома, режимы лазерной записи

Analysis of errors and correction of topology of computer-generated two-dimensional fan-out gratings

V. P. Korolkov, A. G. Sedukhin, R. I. Kuts, S. K. Golubtsov, A. I. Malyshev, V. V. Cherkashin*

¹ Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation
* e-mail: sedukhin@iae.nsk.su

Abstract. A procedure is proposed and investigated for correction of direct laser writing of the topology of two-dimensional diffraction fan-out gratings with the use of a laser-lithographic system DWL66+ operating in the Cartesian system. Thin films of photoresist and chromium on a quartz substrate were used as recording materials. The required binary-phase structures were obtained by subsequent ion-plasma etching of the amplitude structures recorded by the system. The minimum feature size of the binary zones of synthesized structures was 1500×1500 nm. It has been found that,

in order to obtain the stability of the reproduction of the synthesized structures and to approach these structures to the calculated ones, it is necessary to use a regime with partial overexposure of photoresist and correction of position of transition boundaries of exposed zones. The specified correction of position of transition boundaries was experimentally implemented by software, with a modification of the topology of written structures and with experimental founding the optimal diffraction fan-out gratings accounting for their response, with the maximization of efficiency in useful diffraction orders and minimization of the root-mean-square deviation between intensity maxima in useful orders. Taking into account the size of a focused spot (about 550 nm), as well as the recording materials and the regime of photoresist overexposure, it was found that the optimal correction for the displacement of the boundaries of the exposed zones amounts to 200 nm, with the boundaries being shifted to the centers (inside) of the zones.

Keywords: direct laser writing, photoresists, chromium films, laser writing regimes

Введение

При экспериментальном компьютерном синтезе топологических структур бинарно-фазовых дифракционных оптических элементов одной из важнейших задач является обеспечение высокой точности воспроизведения структур с максимальным приближением к их расчетной геометрии. Требуемая на практике точность формирования границ зон элементов составляет в настоящее время порядка десятых или даже сотых долей микрометра [1–4].

Вместе с тем, при использовании стандартных установок литографии со сканирующей прямой лазерной записью реализация указанной задачи осложняется влиянием целого ряда дестабилизирующих факторов, которые приводят к разнообразным ошибкам формирования краев зон синтезируемых элементов [5–7].

В настоящей работе исследуется оптимизация процесса прямой лазерной записи топологической структуры двумерных разветвляющихся дифракционных решеток. Первичная амплитудная маска данной структуры записывается с помощью установки лазерной сканирующей литографии DWL66+ [8] по двухслойному регистрирующему материалу, состоящему из тонких пленок фоторезиста и хрома. Слой хрома используется как маска при переносе топологии решетки в материал подложки.

В качестве фоторезиста использована пленка фоторезиста ФП-2506 (производства ФРАСТ-М) толщиной 0,4–0,5 мкм. Формирование точной топологии и стабильность воспроизведения данной маски является важнейшим звеном в создании конечной фазовой структуры, получаемой ионно-плазменным травлением [9,10] кварцевой подложки с записанной амплитудной маской.

В этой связи, разработка и исследование новых технологических методов и режимов высокоразрешающей и, одновременно, скоростной сканирующей лазерной записи структуры дифракционных элементов представляется достаточно актуальным. В последние годы опубликован широкий ряд работ в этой области как с применением органических резистов [11, 12], так и по безрезистным методам [13–15].

Метод программной коррекции топологии двумерных разветвляющихся решеток

Одними из широко используемых на практике разветвляющихся дифракционных решеток являются бинарно-фазовые решетки Даммана [16,17], структура которых описывается функцией с разделяющимися переменными по декартовым координатам X и Y и имеет глубину фазового рельефа, обеспечивающую модуляцию фазы на π радиан. В отличие от аналогичных решеток, структура которых описывается функцией с неразделяющимися по X и Y переменными, такие решетки способны обеспечить более высокую степень выравнивания интенсивности полезных дифракционных порядков, несмотря на то, что световая эффективность данных решеток, в общем случае, является более низкой и не превышает 60–70%. Кроме того, структура первых из названных решеток является более удобной для высокоточного визирования и измерения сдвигов между краями разнородных пространственно-разнесенных зон. В данной работе, применительно к использованию лазерно-литографической установки DWL66+, исследованы погрешности синтеза амплитудных масок бинарно-фазовых решеток Даммана, структура которых описывается функцией с разделяющимися переменными по декартовым координатам X и Y . С целью повышения скорости записи дифракционных структур фокусирующую головку в установке целесообразно выбирать, исходя из условия соизмеримости размера сфокусированного лазерного пятна и размеров наименьшей зоны в записываемой структуре. Для повышения же точности формирования амплитудных масок при остаточных вариациях мощности записывающего лазерного пучка и неравномерности чувствительности фоторезиста по площади подложки, как было установлено, сканирующую лазерную запись целесообразно проводить с максимально допустимым переэкспонированием фоторезиста (без его абляции). При этом конечные размеры сфокусированного лазерного пятна (порядка 550 мкм) и указанный нелинейный процесс экспонирования приводят к расширению экспонируемых зон по отношению к расчетным. Для поддержания требуемых размеров в данной работе предлагается осуществлять программную коррекцию положения краев экспонируемых зон, со сдвигом краев экспонируемых зон к их центрам в процессе прямой лазерной записи. Указанные сдвиги призваны компенсировать уширение размеров зон при переэкспонировании фоторезиста.

Эксперименты по исследованию указанного метода записи проводились применительно к маскам двумерных бинарно-фазовых разветвляющихся элементов, с коэффициентом разветвления 7×7 . Экспонированный фоторезист подвергался жидкостному травлению в одном из стандартных проявителей с удалением неэкспонированного фоторезиста. Далее, проводилось жидкостное травление пленки хрома на незащищенных фоторезистом участках, после чего оставшийся фоторезист стравливался в органических растворителях. На завершающей стадии проводилось ионно-плазменное травление кварцевой подложки и последующее удаление хромовой пленки. Поскольку ионно-плазмен-

ный процесс является высококонтрастным и топология амплитудной маски с высокой точностью переносится в бинарно-фазовую структуру, в настоящей работе был сделан акцент на детальное исследование метода коррекции именно амплитудных масок.

С учетом того, что размеры минимальных зон в данной структуре составляют порядка 1500×1500 нм, размер сфокусированного лазерного пятна был выбран равным порядка 550 мкм, а величины программных смещений краев зон (в направлении к центрам зон с экспонированием фоторезиста) были выбраны в виде ряда 100, 200, 300, 400 и 500 нм. Далее, экспериментально подобрав предельно допустимую мощность лазерного пучка, были проведены тестовые записи одной и той же синтезируемой структуры с программной коррекцией краев зон на указанные величины. Исследование размеров получаемых топологических структур проводилось путем получения изображений данных структур с помощью оптического и сканирующего электронного микроскопов, а также путем последующего анализа размеров получаемых структур с усреднением пространственного положения краев зон с помощью программы MATLAB. Оптимальным считалось изображение, в котором положение границы зоны, соответствующей изменению пропускания от минимума до максимума (при сканировании изображения слева направо), достаточно хорошо совпадает с положением границ выше и ниже расположенных зон с инверсией фазы, которые соответствуют изменению пропускания от максимума до минимума (по половинному уровню интенсивности). Как было экспериментально установлено, оптимальное смещение границ зон составило 200 нм, что менее половины диаметра лазерного пятна.

В качестве примера, на рис. 1(а) и 1(б) показаны фрагменты изображений записанных амплитудных масок (на фоторезисте и хrome), на которых хорошо заметны погрешности в формировании границ отдельных (близких к прямоугольным) зон, налагающихся друг на друга в своих вершинах.

Заключение

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования по коррекции границ зон разветвляющих дифракционных элементов, синтезируемых с помощью лазерно-литографической установки DWL66+ на кварцевой подложке, покрытой пленками фоторезиста и хрома, продемонстрировали возможность практической реализации топологических структур, близких к расчетным, несмотря на использование режима записи с переэкспонированием фоторезиста.

Благодарности

Работа выполнена за счет средств субсидии на финансовую поддержку государственного задания (гос. регистрационный № 121041500060-2). В исследовании использовалось оборудование ЦКП «Спектроскопия и оптика» ИАиЭ СО РАН.

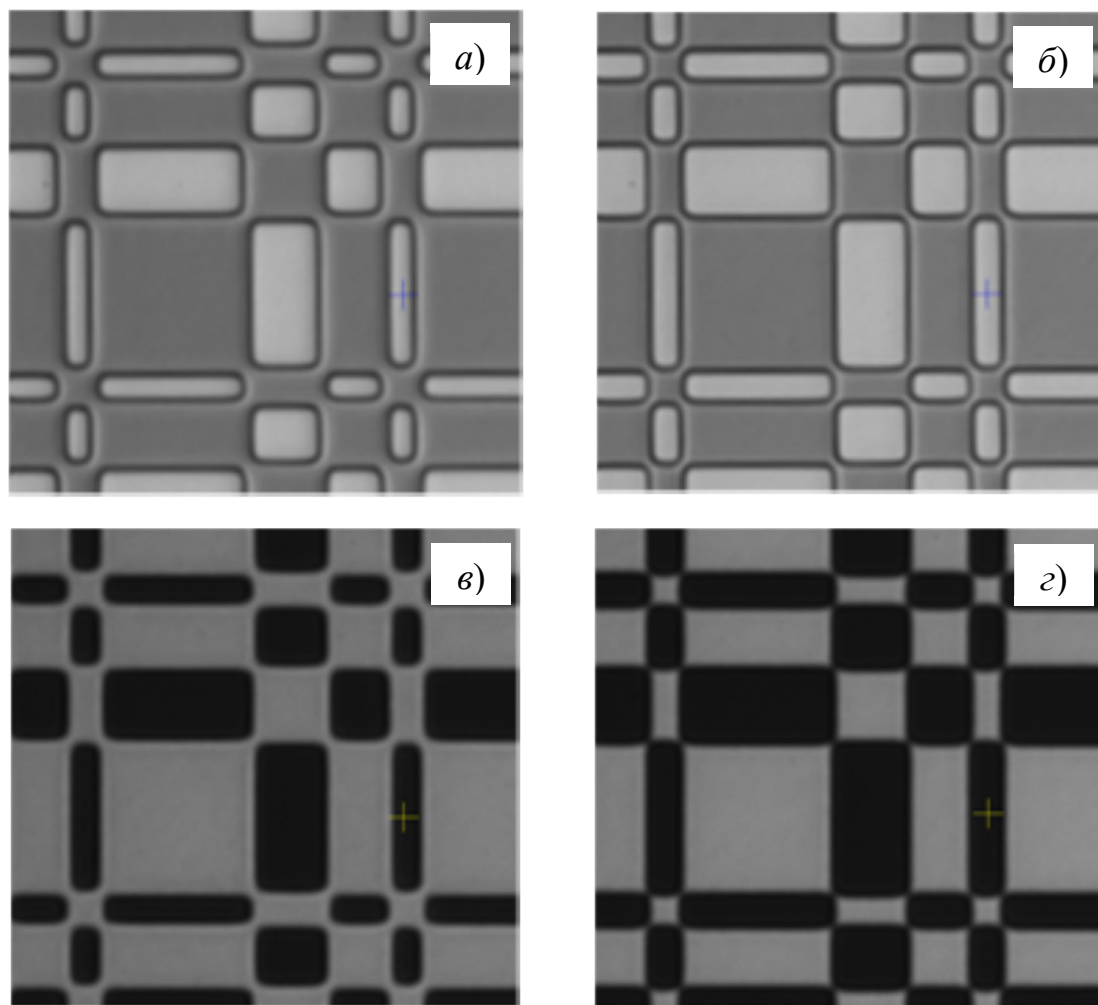


Рис. 1. Фотографии изображений фрагментов амплитудных масок двумерных разветвляющих решеток с минимальным размером зон 1500×1500 нм. Фотографии получены с помощью оптического микроскопа, при работе в отраженном свете: (а) и (б) – изображения на фоторезисте, при смещении границ зон на 200 и 300 нм, соответственно; (в) и (з) – изображения на хроме, при смещении границ зон на 200 и 300 нм, соответственно

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Poleshchuk A. G., Korolkov V. P., Nasyrov R. K. Diffractive optical elements: fabrication and application. Proc. SPIE, 2014. – Vol. 9283. – P. 928302.
2. Shimansky R. V., Belousov D. A., Kuts R. I., Korolkov V. P. Controlling the accuracy of fabricating computer-generated holograms on circular and X-Y laser writing systems, Proc. SPIE, 2021. – Vol. 11871. – P. 118710I.
3. Zhao C., Computer-generated hologram for optical testing: a review. Proc. SPIE, 2021. – Vol. 11813. – P. 118130K.
4. Zhang Z. Yu., Yang X., Zheng L. G. Fabrication of Computer Generated Hologram for Aspheric Surface Measurement. Advanced Materials Research. 2016. – Vol. 1136, Trans Tech Publications, Ltd. – P. 620–623.
5. Коронкевич В. П., Корольков В. П. и др. Точность изготовления дифракционных оптических элементов лазерными записывающими системами с круговым сканированием. Компьютерная оптика. – 1997. – Вып. 17. – С. 63–74

6. Полещук А. Г., Корольков В. П. и др. Методы минимизации ошибок прямой лазерной записи дифракционных оптических элементов. *Автометрия*. – 2002. – Т. 38, № 3. – С. 3–19.
7. Xie Y, Lu Z, Li F. Method for correcting the joint error of a laser writer. *Opt. Express*, 2003. – Vol. 11(9). – P. 975–979.
8. <https://heidelberg-instruments.com/product/dwl-66-laser-lithography-system/>.
9. Корольков В.П., Белоусов Д.А., Нанотехнологии для задач дифракционной оптики. VI Международная конференция и молодежная школа «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ-2020), Самара, 2020. – С. 807 – 822.
10. Odinokov S.B., Sagatelyan G.R., Kovalev M.S., Bugorkov K.N. Features of the plasma-chemical etching of quartz glass during the formation of deep surface relief on high-precision components of devices, *Journal of Optical Technology*. 2019. –Т. 86. № 5. – С. 317–322.
11. Kim H. S., Son B. H., Kim Y. C., and Ahn Y. H. Direct laser writing lithography using a negative-tone electron-beam resist. *Opt. Mater. Express*. – 2020 – Vol.10. – P. 2813–2818.
12. Tsutsumi N., Hirota J., Kinashi K., and Sakai W. Direct laser writing for micro-optical devices using a negative photoresist. *Opt. Express*. 2017. – Vol. 25(25). – P. 31539–31551.
13. Veiko V. P., Zakoldaev R. A., Shakhno E. A., Sinev D. A., Nguyen Z. K., Baranov A. V., Bogdanov K. V., Gedvilas M., Račiukaitis G., Vishnevskaya L. V. and Degtyareva E. N. Thermochemical writing with high spatial resolution on Ti films utilising picosecond laser. *Opt. Mater. Express*. – 2019. – Vol. 9. – P. 2729–2737.
14. Korolkov V.P., Sedukhin A.G., Mikerin S.L. Technological and optical methods for increasing the spatial resolution of thermochemical laser writing on thin metal films. *Optical and quantum electronics*. – 2019. – Vol. 51. – P. 389–399.
15. Korolkov V. P., Kutz R.I., Malyshev A.I., Matochkin A.E., Shimansky R.V. Dry method for the formation of reflective phase DOEs using direct laser writing on thin Zr films. *Proc. SPIE*. – 2020. – Vol. 11551. – P. 115511O.
16. Dammann, K. Gortler. H. High-efficiency in-line multiple imaging by means of multiple phase holograms. *Opt. Commun.* – 1971. – Vol. 3. – P. 312–315.
17. Damman H. Klotz E. Coherent optical generation and inspection of two-dimensional periodic structures. *Opt. Acta*. – 1977. – Vol. 24. – P. 505–515.

© В. П. Корольков, А. Г. Седухин, Р. И. Куц, С. К. Голубцов,
А. И. Малышев, В. В. Черкашин, 2022