

*Р. И. Куц*¹, Е. О. Мандрусова^{1,2}, В. П. Корольков¹, А. Г. Седухин¹*

Прямая лазерная запись на тонких пленках хрома пучком с негауссовым распределением

¹Институт автоматизации и электротехники СО РАН, г. Новосибирск,
Российская Федерация

²Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск,
Российская Федерация

*e-mail: r.i.kuts@mail.ru

Аннотация. В данной работе рассмотрена проблема повышения пространственного разрешения технологии прямой лазерной записи, используемой для создания дифракционных структур компьютерно-синтезированных голограмм. Прямая лазерная запись традиционно осуществляется путем термохимического окисления тонкой металлической пленки хорошо сфокусированным гауссовым пучком. Пространственное разрешение в этом случае ограничено дифракционным пределом и качеством гауссова пучка. Существует пороговый уровень мощности термохимического окисления, ниже которого окисление не происходит. Это позволяет использовать негауссово распределение интенсивности в пределах пятна записи, которое имеет боковые лепестки вокруг узкого центрального пика. Негауссово распределение было получено путем искажения гауссова пучка кольцевой диафрагмой. Запись осуществлялась на литографической установке с длиной волны записывающего излучения 405 нм и шириной неискаженного пятна в фокусе ~750 нм. Показано, что ширина центрального пика (FWHM) может быть на 40% меньше ширины гауссова пятна. При этом интенсивность самого мощного бокового лепестка составляет не более 18% от интенсивности центрального пика. Тестовые структуры записывались на пленках хрома толщиной до 30 нм. Было показано, что путем искажения гауссова пятна можно получить ширину одиночной линии на 38% меньше.

Ключевые слова: дифракционные оптические элементы, прямая лазерная запись, тонкие металлические пленки, пленки хрома, пространственное разрешение, негауссово распределение

*R. I. Kuts*¹, E. O. Mandrusova^{1,2}, V. P. Korolkov¹, A. G. Sedukhin¹*

Direct Laser Writing on Thin Chromium Films with a Non-Gaussian Intensity Distribution in the Writing Laser Spot

¹Institute of Automation and Electrometry SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

²Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation

*e-mail: r.i.kuts@mail.ru

Abstract. In this paper, we consider the problem of increasing the spatial resolution of the direct laser writing technology used to create diffractive structures of computer holograms. Direct laser writing is traditionally carried out by thermochemical oxidation of a thin metal film with a well-focused Gaussian beam. The spatial resolution in this case is limited by the diffraction limit and the quality of the Gaussian beam. There is a threshold power level for thermochemical oxidation below which no oxidation occurs. This makes it possible to use a non-Gaussian intensity distribution within the writing spot, which has side lobes around a narrow central peak. The non-Gaussian distribution was obtained by distorting the Gaussian beam with an annular diaphragm. Writing was performed on a lithographic system with a writing radiation wavelength of 405 nm and an undistorted spot width at the

focus of ~ 750 nm. It has been shown that the width of the central peak (FWHM) can be 40% smaller than the width of the Gaussian spot. Test structures were written on chromium films up to 30 nm thick. It has been shown that by distorting the Gaussian spot, a single line width of 38% less can be obtained.

Keywords: diffractive optical elements, direct laser writing, thin metal films, chromium films, spatial resolution, non-Gaussian distribution

Введение

Технология прямой лазерной записи хорошо зарекомендовала себя для создания дифракционных оптических элементов и компьютерно-синтезированных голограмм (КСГ) [1–5]. Один из путей развития технологии прямой лазерной записи – это повышение пространственного разрешения при изготовлении микроструктурированных поверхностей. При создании широкоапертурных компьютерно-синтезированных голограмм методом прямой лазерной записи требуется создание дифракционных зон субмикронного размера.

Пространственное разрешение определяется, как правило, дифракционным пределом фокусировки лазерного записывающего излучения, а также особенностями оптического канала литографической установки. Данная технология позволяет создавать структуры, характерный размер которых сравним с диаметром записывающего пятна. Большинство оптических схем лазерных литографических установок имеет записывающее пятно с распределением интенсивности, близким к гауссову. Ранее были работы, в которых было реализовано увеличение пространственного разрешения путем использования пленочных материалов с пороговыми тепловыми свойствами [6]. Если производить запись с мощностью, немного превышающей пороговую, то структура будет формироваться только под воздействием самого пика гауссова записывающего пятна. Таким образом, можно получить структуры меньшего размера [7].

При прямой лазерной записи на тонких металлических пленках формирование микроструктур происходит из-за поверхностного термохимического окисления. Синтез оксидного слоя при экспонировании лазерным излучением изменяет как пропускание, так и отражение образца, таким образом может измениться и эффективный коэффициент поглощения для данного лазерного излучения. Так, при воздействии на металлическую пленку излучением с гауссовым профилем мощности в центре пятна пленка просветляется быстрее, что ведет к проходу излучения при экспозиции в следующий момент времени. Процесс окисления заметно замедляется [7]. Таким образом, эффективная записывающая область имеет размеры, меньшие, чем размер пятна, что дает возможность повысить пространственное разрешение при лазерной записи на тонких металлических пленках.

Кроме того, при использовании пленочных материалов с пороговыми свойствами можно подобрать форму профиля интенсивности записывающего пятна для повышения пространственного разрешения. Перспективной идеей является запись структур с использованием пятна с негауссовым распределением, имеющим интенсивный центральный пик и менее интенсивные боковые лепестки. За

счет того, что запись производится только при достижении пороговой мощности, боковые лепестки записывающего пятна в ней практически не участвуют. Примером такого негауссового пучка может являться пучок с бесселевым (нулевого порядка) распределением интенсивности. Такая работа была произведена на НЕBS-стеклах, имеющих резкий порог по мощности записи, и было показано преимущество негауссова пучка с точки зрения увеличения пространственного разрешения [8]. Для создания КСГ широко применяется технология прямой лазерной записи на тонких пленках хрома [9–12]. В этой связи, уменьшение размера формируемых в пленках хрома структур является актуальной задачей. В данной работе предлагается развить идею использования негауссового записывающего пучка с апробацией его использования на тонких (~30 нм) пленках хрома. Пленки именно такой толщины могут использоваться в классической технологии создания КСГ, при которой важно сформировать устойчивую к реактивному ионному травлению хромовую маску. Это необходимо для успешного создания фазового микрорельефа КСГ в кварцевой подложке.

Получение модифицированного пятна

Были получены изображения исходного гауссова пятна и искаженных пятен с негауссовым распределением. Модификация пятна осуществлялась с помощью внедрения кольцевых диафрагм (рис. 1а.) Излучение фокусируется объективом с NA 0,6 и наблюдалось объективом с NA 0,9. На рис. 1б показаны сечения распределения интенсивностей при различных внутренних диаметрах кольцевых диафрагм, а значения диаметров полученных пятен приведены в табл. 1. При диафрагме с шириной кольца 1,5 мм (внутренний диаметр 5 мм), диаметр центрального пика в ~1,7 раза меньше диаметра немодифицированного пятна. При этом интенсивность боковых лепестков, с учетом нормировки на центральный пик, не превышает 20%.

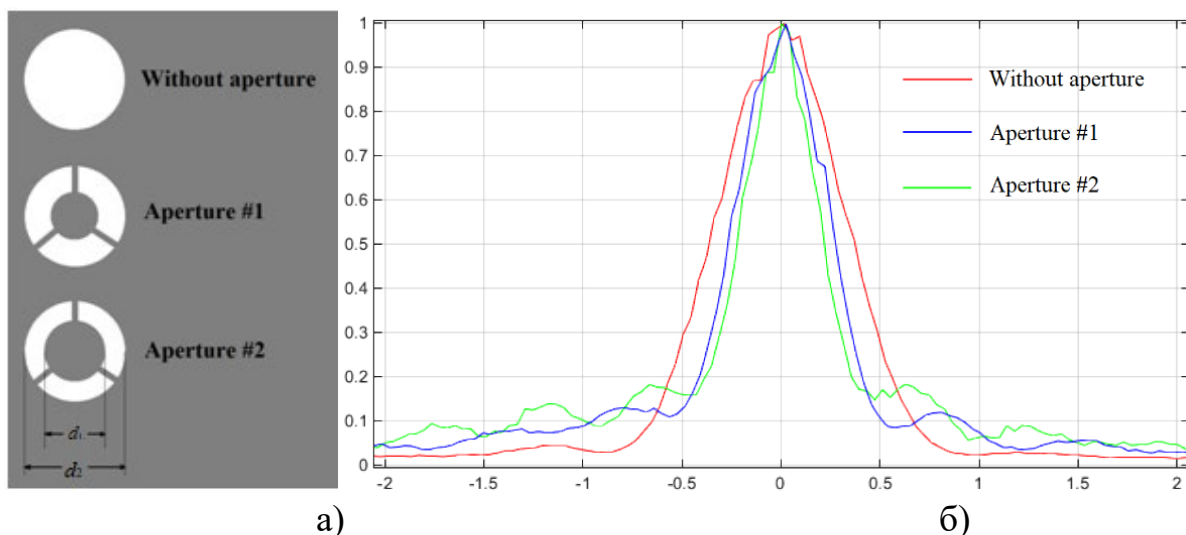


Рис. 1. а) Схема кольцевых диафрагм для модификации пятна; б) сечение распределения интенсивностей при различных внутренних диаметрах кольцевых диафрагм

Результаты измерения диаметров пятен

Тип апертуры	$d1$	Диаметр пятна FWHM, нм
Без апертуры	0	750
#1	4,5	550
#2	5	440

Лазерная запись микроструктур с гауссовым и негауссовым распределениями

Были выполнены эксперименты по прямой лазерной записи одиночных линий с различной мощностью, используя гауссово и негауссово распределение интенсивности внутри записываемого пятна. Для более плавного постепенного выращивания оксидного слоя, каждая одиночная линия была записана за 3 прохода. Кроме того, трехпроходная запись используется при производстве широкоапертурных КСГ, имеющих на периферии периоды дифракционной структуры ~ 1 мкм. Использование трех проходов позволяет создавать одинаковые по свойствам структуры при «раздвигании» треков (плавном увеличении периода). Запись производилась на установке ХУ лазерного нанолитографа с длиной волны записываемого лазера 405 нм. Режим записи – импульсный, длина импульсов ~ 2 мкс, расстояние между ними равно 250 нм. Скорость сканирования $\sim 1,6$ мм/с.

После этапа прямой лазерной записи по пленке хрома образец подвергался проявлению в селективном травителе на основе красной кровяной соли. В результате были получены одиночные дорожки разной ширины, которая зависит от мощности записи.

Целью экспериментов являлась количественная оценка выгоды использования негауссового распределения интенсивности в пятне по сравнению с гауссовым. Так как негауссов пучок был получен путем внедрения в оптический канал кольцевой диафрагмы, закрывающей большую часть излучения, эксперименты по записи двумя типами пятен были проведены при сильно разных мощностях. Размер формируемой структуры всегда зависит от мощности записи. За ключевой параметр, позволяющий исключить зависимость от мощности, мы взяли критическую мощность. Это такая мощность, ниже которой прекращается абляция и начинается термохимическое окисление. При дальнейшей характеристике тестовых структур привязка к мощности записи осуществлялась в терминах относительной мощности записи. Относительная мощность записи, в нашем случае, это отношение мощности записи к критической мощности.

Измерение ширины дорожек производилось путем сканирования структур на атомно-силовом микроскопе Park XE15. Карты распределения высот тестовых структур, полученные на атомно-силовом микроскопе (АСМ), представлены на рис. 2. Были построены зависимости ширины дорожек от относительной мощности записи, представленные на рис. 3.

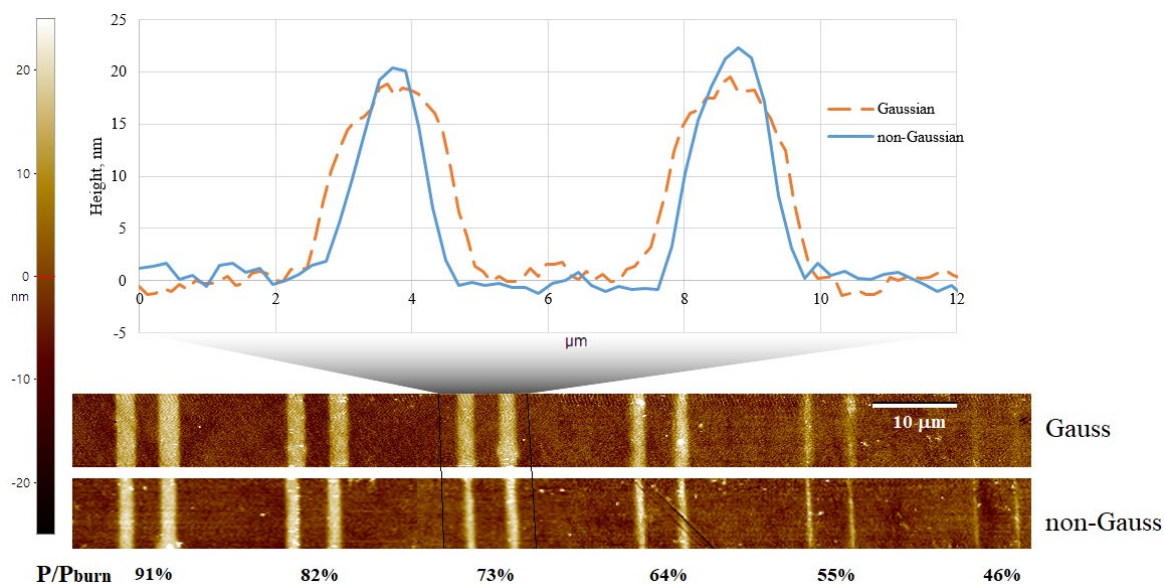


Рис 2. АСМ-анализ тестовых записей одиночных линий

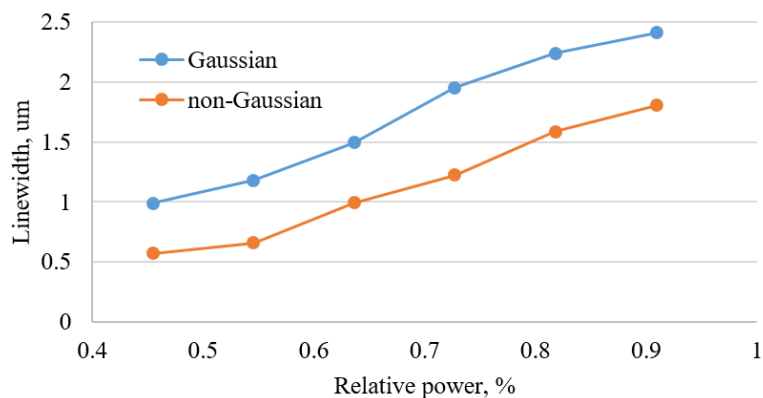


Рис. 3. Ширина хромовой дорожки, сформированной записью гауссовым и негауссовым пятном в зависимости от относительной мощности записи

На графике видно, что при записи негауссовым пятном достигается ширина дорожек примерно на 35% меньше, чем при записи гауссовым пятном. Это сравнимо с соотношением диаметров гауссова и негауссова пятен. По результатам этих экспериментов, можно сделать вывод, что при более острой фокусировке лазерного излучения и при использовании негауссова пятна можно достигнуть размера структур, меньшего, чем дифракционный предел для данной длины волны записывающего лазера.

Заключение

Предложен и исследован метод термохимической прямой лазерной записи на тонких пленках хрома с использованием негауссового распределения интенсивности света. Негауссово распределение было получено путем введения кольцевых диафрагм в оптический канал пишущей системы. Ширина полученного пятна была

на 40% меньше диаметра гауссова пятна. Были написаны одиночные линейные треки и одиночные питы. Было показано, что, изменяя распределение интенсивности луча, ширину дорожки можно уменьшить на 38%. Оптимальная мощность записи с использованием негауссового пятна составляет 67% от мощности записи.

Благодарности

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Metev S. M., Veiko V. P., Savchenko S. G. et. al. Thermochemical action of laser radiation on thin metal films // Proc. IEEE Journ. Quant. Electr. – 1981. – 17. – N 9. – 2004–2007.
2. Pruss C., Reichelt S., Korolkov V. P., Osten W., Tiziani H., Performance improvement of CGHs for optical testing // Proc. SPIE 5144, Optical Measurement Systems for Industrial Inspection III, (30 May 2003).
3. Zhao Q., Qiu J. et. al., Direct writing computer-generated holograms on metal film by an infrared femtosecond laser // Opt. Express 13, 2089-2092 (2005).
4. Wei J. (2019). Laser Heat-Mode Lithography: Principle and Methods. DOI: 10.1007/978-981-15-0943-8.
5. Wei T., Wei J. et. al., Origin of arbitrary patterns by direct laser writing in telluride thin film // May 2016, RSC Advances 6 (51).
6. A. G. Poleshchuk and V. P. Korolkov "Laser writing systems and technologies for fabrication of binary and continuous relief diffractive optical elements", Proc. SPIE 6732, International Conference on Lasers, Applications, and Technologies 2007: Laser-assisted Micro- and Nanotechnologies, 67320X (17 July 2007). <https://doi.org/10.1117/12.751930>.
7. Victor P. Korolkov, Andrey G. Sedukhin, Dmitry A. Belousov, Ruslan V. Shimansky, Vladimir N. Khomutov, Sergey L. Mikerin, Evgeny V. Spesivtsev, Roman I. Kutz, "Increasing the spatial resolution of direct laser writing of diffractive structures on thin films of titanium group metals", Proc. SPIE 11030, Holography: Advances and Modern Trends VI, 110300A (23 April 2019). DOI: 10.1117/12.2520978
8. Michael R. Wang and Xu Guang Huang, "Subwavelength-resolvable focused non-Gaussian beam shaped with a binary diffractive optical element". Appl. Opt. 38, 2171-2176 (1999).
9. Shakhno E. A., Nguen Q. D. Dynamics of the laser heating and oxidation of thin metallic films, allowing for absorptivity variation // J. Opt. Technol. 83 (4), 2016.
10. Burge J., Applications of computer-generated holograms for interferometric measurement of large aspheric optics // Proc. SPIE 2576, International Conference on Optical Fabrication and Testing (2 August 1995).
11. Poletaev S.D., Laser ablation of thin films of molybdenum for the fabrication of contact masks elements of diffractive optics with high resolution // Proceedings of Information Technology and Nanotechnology (ITNT-2015), CEUR Workshop Proceedings, 2015; 1490: 82-89.
12. Kotsedi L., Nuru Z.Y. et. al., Femtosecond laser surface structuring and oxidation of chromium thin coatings: black chromium // Appl. Surf. Sci. 321 (2014), 560–565.
13. Victor P. Korolkov, Roman I. Kutz, Anatolij I. Malyshev, Alexey E. Matochkin, and Ruslan V. Shimansky "Dry method for the formation of reflective phase DOEs using direct laser writing on thin Zr films", Proc. SPIE 11551, Holography, Diffractive Optics, and Applications X, 115511O (10 October 2020); <https://doi.org/10.1117/12.2574196>.

© П. И. Куц, Е. О Мандрусова, В. П. Корольков, А. Г. Седухин, 2023