

# Обратная абляция плёнок молибдена под действием лазерного излучения

С.Д. Полетаев<sup>а,б</sup>

<sup>а</sup> Институт систем обработки изображений - филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН», 443001, ул. Молодогвардейская, 151, Самара, Россия

<sup>б</sup> Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, 443086, Московское шоссе 34, Россия, Самара

## Аннотация

Исследован процесс обратной абляции плёнок молибдена под действием непрерывного лазерного излучения для целей формирования микрорельефа элементов дифракционной оптики. Показано, что данная методика позволяет записывать треки без образования зоны термического воздействия, а также треки высокого качества с минимальной шириной, равной диаметру фокального пятна лазерного излучения.

*Ключевые слова:* дифракционный микрорельеф; тонкие плёнки; лазерная абляция;

## 1. Введение

В настоящее время селективная абляция металлических плёнок лазерным излучением применяется в таких областях, как полупроводниковое производство, фотоэлектрические устройства, дифракционные решетки и другие высокотехнологичные приложения [1-7]. Обычно для этих целей применяется так называемая прямая абляция, когда лазерное излучение непосредственно воздействует на поверхность пленки. Однако методике присущи такие недостатки как образование зоны термического воздействия вокруг области абляции, обусловленное продуктами разрушения плёнки, а также сложность формирования элементов микроструктур с размером, многократно превышающим диаметр фокального пятна [5,6].

С целью устранения этих недостатков в данной работе предлагается методика обратной абляции, при которой воздействие лазерного излучения на плёнку металла производится через толщу подложки с высоким коэффициентом пропускания лазерного излучения.

В литературе отсутствует однозначное мнение об эффективности данной методики по отношению к указанным недостаткам. Одни исследователи указывают на ухудшение качества краёв треков и увеличение их размера по сравнению с прямой абляцией [7]. Другие указывают на возможность формировать треки с относительно ровными краями без образования зоны термического воздействия [6,8].

В настоящей работе исследуется возможность применения обратной абляции тонких плёнок молибдена, нанесённых на стеклянные подложки, под действием непрерывного, остросфокусированного лазерного излучения с длиной волны 488 нм для формирования бездефектных микроструктур элементов дифракционной оптики видимого и ультрафиолетового диапазонов.

## 2. Методика эксперимента и результаты

Плёнки молибдена толщиной 35 нм наносились магнетронным способом на стеклянные подложки размером 25×25 мм и толщиной 0,1 мм.

Микроструктуры формировались на станции лазерной записи CLWS-200 [9, 10] при следующих условиях: рабочая длина волны лазерного излучения – 488 нм; диаметр фокального пятна 0,8 мкм; структура записи – концентрические кольца с шагом 3 мкм; скорость сканирования 190 мм/с; плотность энергии лазерного излучения находилась в пределах 1-20 Дж/см<sup>2</sup>. Измерения проводились при помощи сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) Supra 25.

На рисунке 1 представлены снимки, полученные сканирующей электронной микроскопией. Записанные треки соответствуют плотности энергии лазерного излучения около 2 Дж/см<sup>2</sup>. Видно, что значение шероховатости краёв треков составляет порядка 30% от диаметра фокального пятна. Численный анализ распределения интенсивности в дальней зоне дифракции, приведённый в [11] для подобной решётки, показал, что шероховатость краёв треков не оказывает влияния на конечный результат. Следовательно, для приложений дифракционной оптики данную погрешность можно считать приемлемой.

Другая особенность представленного микрорельефа заключается в отсутствии так называемой зоны термического воздействия, прилегающей к зоне абляции. Зона термического воздействия может проявляться в виде оплавлений, микрозаусенцев, трещин и тому подобных образований. Однако, вокруг треков наблюдаются незначительные круговые образования на границе раздела стекло/плёнка, что, вероятнее всего, связано с ухудшением адгезии плёнки в процессе её разрушения.

На рисунке 2 показаны результаты формирования треков размером, многократно превышающим диаметр фокального пятна лазерного излучения. Запись треков проводилась с шагом 250 нм. Сравнительный анализ результатов показал, что в случае прямой абляции (рисунок 2а) формируется сплошная, бесформенная масса. На рисунке 2б показан микрорельеф с периодом 20 мкм (тёмные линии – металл, светлые – стекло), полученный путём обратной абляции.

Видно, что в области абляции происходит полное удаление плёнки металла, и поверхность подложки выглядит чистой (рисунок 2в).

Невозможность записи микроструктуры прямым воздействием можно объяснить образованием зоны термического воздействия. В работе [12] было показано, что её ширина составляет не менее половины ширины зоны абляции. Поэтому при движении лазерного пучка по зоне термического воздействия происходит нарушение нормального режима абляции вследствие расфокусировки фокального пятна.

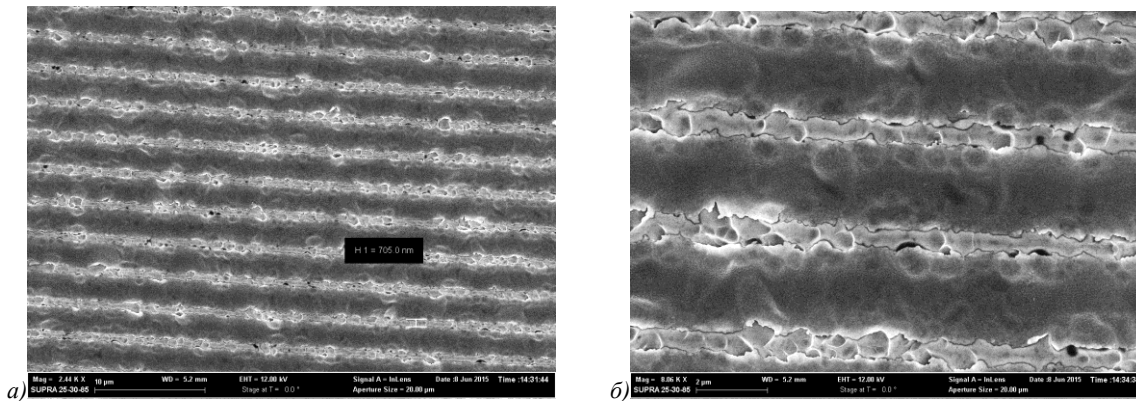


Рис. 1. СЭМ снимок микроструктур на плёнке молибдена, записанных с плотностью энергии около 2 Дж/см<sup>2</sup>, общий вид (а) и увеличенный масштаб (б).

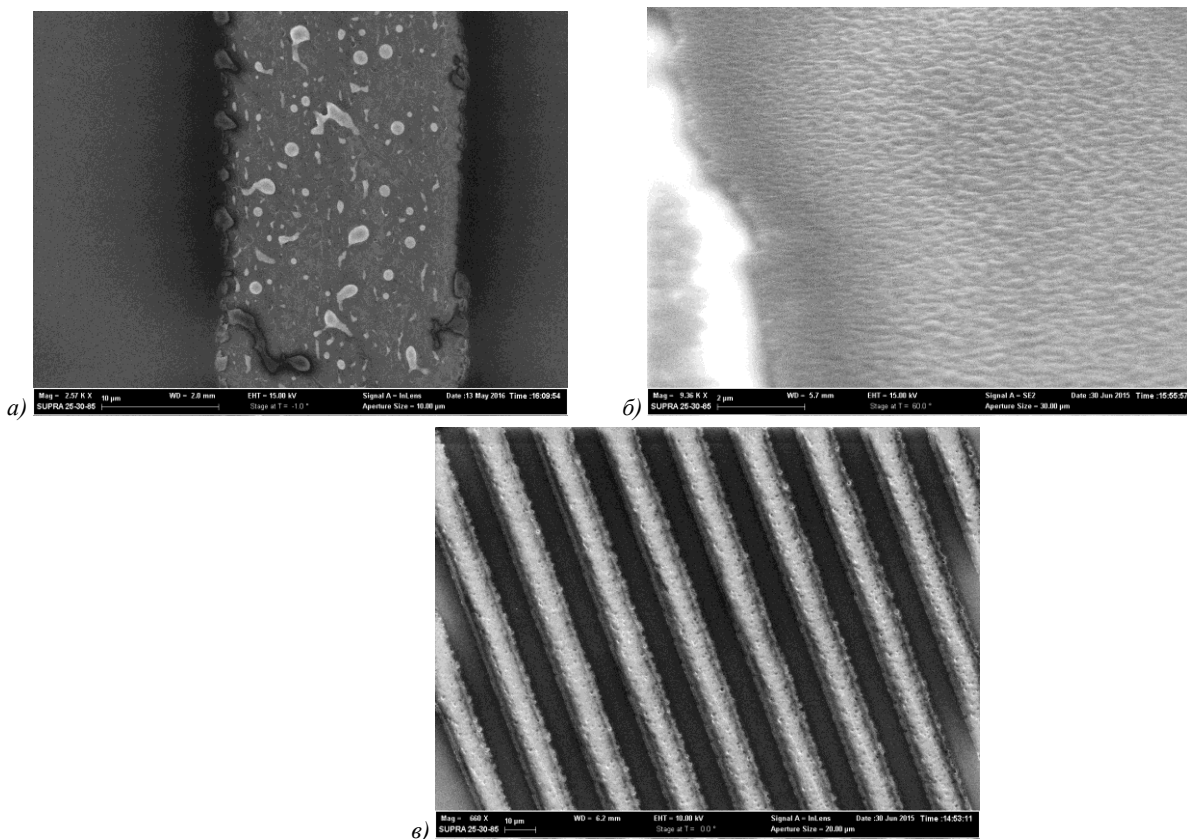


Рис. 2. СЭМ снимок микроструктур на плёнке молибдена, записанных прямым воздействием (а), обратным воздействием с периодом 20 мкм (б), поверхность подложки в зоне абляции (в). Шаг записи 250 нм.

### 3. Заключение

В работе исследована возможность применения обратной абляции тонких плёнок молибдена под действием непрерывного, остросфокусированного лазерного излучения с длиной волны 488 нм для формирования оптических микроструктур видимого и ультрафиолетового диапазонов.

Исследования показали отсутствие зоны термического воздействия вокруг треков, часто наблюдаемой в процессе прямой абляции. Элементы шириной, превышающей размер фокального пятна, также имеют высокое качество без образования каких-либо загрязнений. Однако, неровность краёв треков достигает 30% от диаметра фокального пятна, что, однако, приемлемо для ряда приложений дифракционной оптики.

Дальнейшие работы в данной области должны быть направлены на устранение неровности краёв треков, что, предположительно, может быть достигнуто путём оптимизации режима лазерной записи, подбором микроструктуры и толщины металлических плёнок, а также материала подложек.

## Благодарности

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (№ 16-29-11744, № 16-29-09528).

## Литература

- [1] Tan, B. High repetition rate femtosecond laser nano-machining of thin films / B. Tan, A. Dalili, K. Venkatakrishnan // *Applied Physics A*. – 2009. – Vol. 95. – P. 537-545.
- [2] Wang, X.C. 355 nm DPSS UV laser surface texturing on Si substrate / X.C. Wang, L.Y.L. Wu, Q. Shao, H.Y. Zheng // *SIMTech technical reports*. – 2009. – Vol. 10(4). – P. 203-208.
- [3] Krause, S. Precise microstructuring of indium-tin oxide thin films on glass by selective femtosecond laser ablation / S. Krause, T. Miclea, F. Steudel, S. Schweizer, G. Seifert // *EPJ Photovoltaics*. – 2013. – Vol. 4(40601). – P. p1-p5.
- [4] Ihlemann, J. Fabrication of diffractive phase elements for the UV-range by laser ablation patterning of dielectric layers / J. Ihlemann, D. Schafer // *Appl. Surf. Science*. – 2002. – Vol. 197-198. – P. 856-861.
- [5] Zoppel, S. Selective ablation of thin Mo and TCO films with femtosecond laser pulses for structuring thin film solar cells / S. Zoppel, H. Huber, G. A. Reider // *Applied Physics*. – 2007. – Vol. A 89. – P. 161-163.
- [6] Heise, G. Laser ablation of thin molybdenum films on transparent substrates at low fluences / G. Heise, M. Englmaier, C. Hellwig, T. Kuznicki, S. Sarrach, Heinz P. Huber // *Applied Physics A: Materials Science & Processing*. – 2011. – Vol. 102, N 1. – P. 173-178.
- [7] Venkatakrishnan, K. Laser writing techniques for photomask fabrication using a femtosecond laser. / K. Venkatakrishnan, B.K.A Ngoi, P. Stanley, L.E.N. Lim, B. Tan, N.R. Sivakumar // *Applied Physics A*. – 2002. – Vol. 74. – P. 493-496.
- [8] Wenjun, W. Effect of film properties on the material removing characteristics in femtosecond laser rear-side ablation of chromium film / W. Wenjun, M. Xuesong, J. Gedong, W. Kedian, Y. Chengjuan // *Applied Physics A: Materials Science & Processing*. – 2012. – Vol. 44. – P. 153-158.
- [9] 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 // *Applied Optics*. – 1999. – Vol. 38, N 8. – P. 1295-1301.
- [10] Kazanskiy, N.L. Research and Education Center of Diffractive Optics / N.L. Kazanskiy // *Proceedings of SPIE*, 2012, Vol.8410, 84100R, DOI: 10.1117/12.923233.
- [11] Полетаев, С.Д. Анализ погрешностей лазерной записи оптических микроструктур на плёнках молибдена/ С.Д. Полетаев, С.Г. Вологовский // *Компьютерная оптика*. – 2016. – Т. 40, № 3. – С. 422-426.
- [12] Волков, А.В. Высокореазирующая лазерная запись контактных масок на плёнках молибдена для изготовления элементов дифракционной оптики / А.В. Волков, О.Ю. Монсеев, С.Д. Полетаев // *Компьютерная оптика*. – 2013. – Т. 37, № 2. – С. 220-225.