

АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ ЛАЗЕРНОЙ ЗАПИСИ ОПТИЧЕСКИХ МИКРОСТРУКТУР НА ПЛЁНКАХ МОЛИБДЕНА

С.Д. Полетаев^{1,2}, С.Г. Волотовский¹

¹ Институт систем обработки изображений РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Самара, Россия,

² Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия

Аннотация

Методом вычислительного эксперимента исследовано влияние технологических погрешностей формирования амплитудных оптических решёток, изготовленных методом лазерной абляции тонких плёнок молибдена, на распределение дифракционных порядков в дальней зоне дифракции. Для этого оцифровывалась профилограмма участка сформированной дифракционной структуры с последующим преобразованием в амплитудную или фазовую функции пропускания.

Ключевые слова: дифракционный микрорельеф, амплитудный оптический элемент, лазерная абляция.

Цитирование: Полетаев, С.Д. Оптические микроструктуры на плёнках молибдена / С.Д. Полетаев, С.Г. Волотовский // Компьютерная оптика. – 2016. – Т. 40, № 3. – С. 422-426. – DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-3-422-426.

Введение

В настоящее время абляция металлических плёнок лазерным излучением широко используется в таких областях, как полупроводниковое производство, фотоэлектрические устройства, дифракционные решетки и другие высокотехнологичные приложения [1–9]. В данной области исследований актуальной является задача формирования амплитудных дифракционных оптических элементов (ДОО), а также маскирующих слоёв, применяемых для переноса микрорельефа в подложку. В этом отношении перспективны тонкие плёнки молибдена [6], поскольку молибден имеет следующие особенности:

- низкие температуры окисления металла и сублимации оксида;
- высокое соотношение температуропроводностей металл/оксид.

В работах [10–12] показана возможность формирования оптических микроструктур путём лазерной абляции тонких плёнок молибдена. Был обнаружен эффект трёхкратного сокращения размера зоны абляции (по сравнению с диаметром фокального пятна). Однако края треков получались неровными, вокруг треков формировалась зона термического воздействия, обусловленная окислением металла.

Цель настоящей работы заключается в выявлении влияния технологических погрешностей изготовления решёток на эффективность их работы.

Для этого было проведено моделирование пространственного спектра фокусировки в дальней зоне.

1. Методы и материалы

Микроструктуры формировались на станции лазерной записи CLWS-200 [13–14] в следующей последовательности технологических операций:

- напыление тонкой плёнки молибдена на подложку;
- формирование тестовой решётки путём локальной абляции плёнки под воздействием лазерного излучения.

Основанием служили оптически гладкие подложки из стекла и плавленого кварца марки КВ размером 50×50 мм, толщиной 3 мм. Плёнки молибдена с тол-

щиной 17 нм наносилась магнетронным способом на установке «Каролина Д-12А» (Россия, Зеленоград) при следующих условиях: мощность магнетрона – 700 Вт, температура подложек – 200°С, давление аргона – $2,0 \cdot 10^{-1}$ Па. Время напыления составляло 2 мин.

Лазерная запись проводилась при следующих условиях: рабочая длина волны лазерного излучения – 488 нм; максимальная мощность, подводимая к головке записи, – около 100 мВт; структура записи – концентрические кольца с шагом 3 мкм и внешним радиусом 3 мм; величина мощности для каждого кольца уменьшалась от 100% в точке наибольшего радиуса до 0 в центре с шагом 0,5%. Скорость вращения образца – 10 об/с. Указанные параметры процесса соответствовали максимальной плотности мощности лазерного излучения $E_{\max} = 2 \cdot 10^7$ Вт/см². Воздействие лазерного излучения приводило к локальной абляции плёнки молибдена.

2. Анализ результатов

Фрагмент решётки, подвергшейся анализу, приведен на рис. 1 [10]. Ширина треков – в пределах 250–400 нм.

Структура представлена на рис. 1 путём бинаризации и может быть преобразована в бинарную дифракционную решётку (рис. 2б).

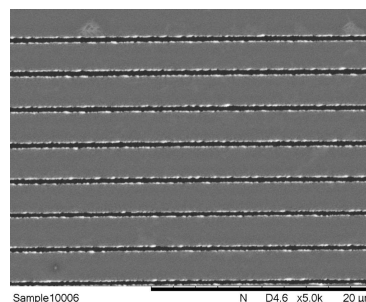


Рис. 1. Снимок решётки, подвергшейся анализу

Получившаяся структура является амплитудной решёткой с разными по размеру зонами. При этом полученный вариант является амплитудной решёткой, но без особых проблем может быть превращён в фазовую дифракционную решётку. Рассмотрим работу полученной структуры в обоих вариантах.

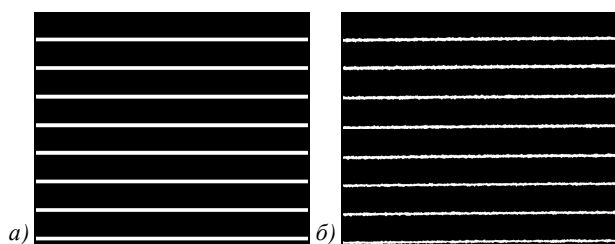


Рис. 2. Преобразованный вид идеальной (а) и реальной (б) решётки (негативные изображения)

Для наглядности на рис. 3 показана профилограмма участка выведенной структуры (рис. 3а), снятая в направлении, перпендикулярном трекам записи, с помощью профилометра Тенсор. Профиль аналогичной бинарной решетки показан на рис. 3б.

Для расчета распределение интенсивности в дальней зоне дифракции плоской световой волны на рассматриваемой двумерной структуре использовались быстрые алгоритмы прямого расчета преобразования Фурье [15–17].

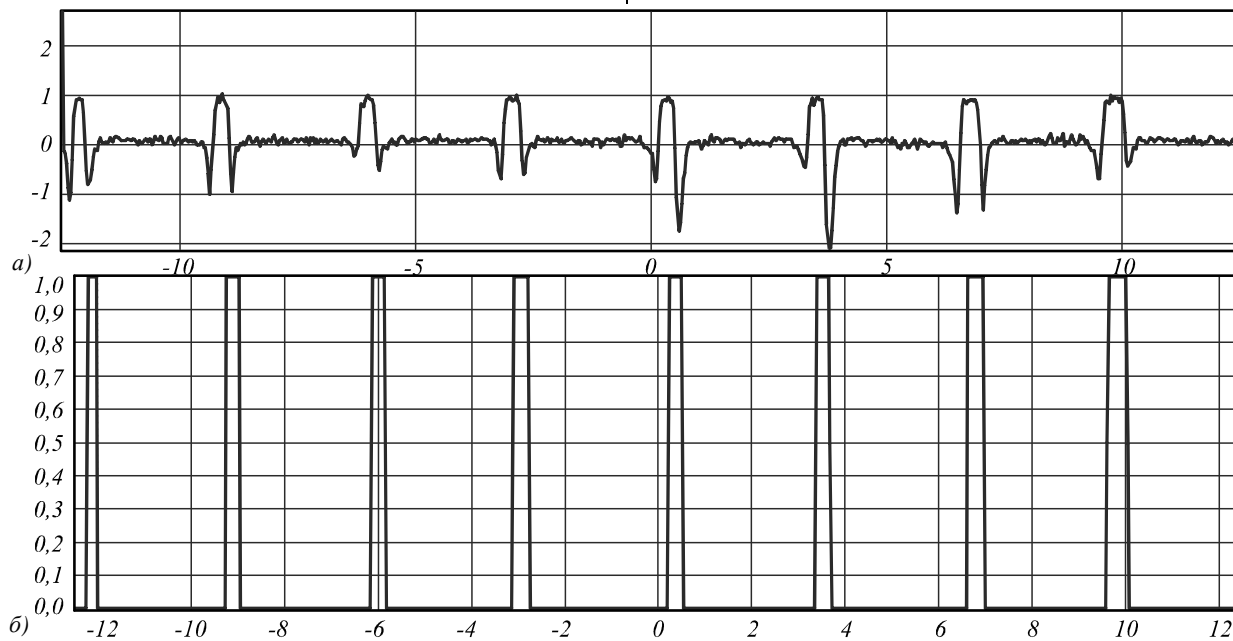


Рис. 3. Профили участка (а) реальной и (б) приведённой к бинарному виду дифракционной структуры

Расчет на основе численного интегрирования, в отличие от алгоритмов быстрого преобразования Фурье, позволяет корректно оценивать физические характеристики формируемых полей. Особенно это важно при анализе диспергирующих свойств дифракционных решеток [18, 19].

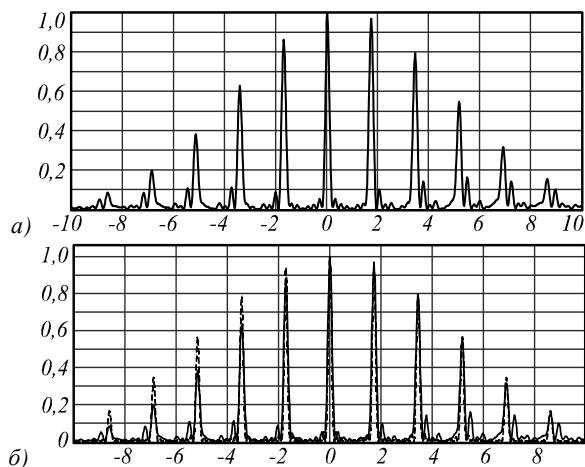


Рис. 4. Распределение интенсивности по порядкам в дальней зоне дифракции от амплитудной структуры, представленной на рис. 3 (а), то же самое распределение интенсивности по порядкам в дальней зоне дифракции от амплитудной структуры, представленной на рис. 2б в сравнении с распределением от идеальной решетки (пунктирная линия) (б)

На рис. 4а приведено распределение интенсивности по порядкам, на рис. 4б – то же самое распределение вместе с распределением интенсивности идеальной амплитудной решетки (рис. 2а) с тем же самым периодом и шириной треков. Среднеквадратичное отклонение двух графиков на рис. 4б составляет 0,26, что с учётом характера распределения является не большой ошибкой. Также была промоделирована дифракция на фазовой решетке этого типа. Для этого оцифрованное распределение, показанное на рис. 1, было преобразовано в фазовую пропускающую функцию, профиль которой показан на рис. 5.

На рис. 6а представлено распределение интенсивности в дальней зоне дифракции, полученное после использования преобразования Фурье. На рис. 6б – то же распределение в сравнении с распределением идеальной фазовой решетки с тем же периодом и шириной треков. Среднеквадратичное отклонение двух графиков на рис. 6б составляет 0,21, что с учётом характера распределения также является не большой ошибкой, т.к. в данном случае важнее точное совпадение положения максимумов.

Заключение

В работе экспериментально показана возможность создания оптических структур субмикронного разрешения. Также путем моделирования показана работоспособность сформированных структур как в амплитудном, так и в фазовом варианте.

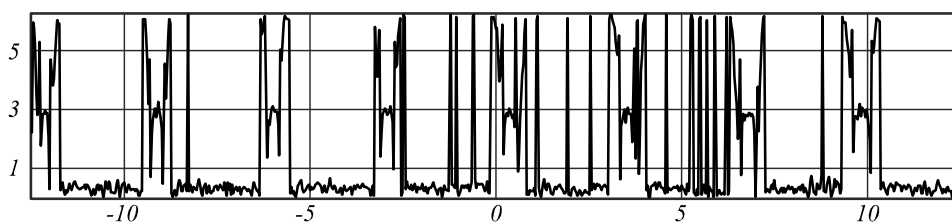


Рис. 5. Сечение фазовой пропускающей функции, полученное из профилограммы на рис. 2а

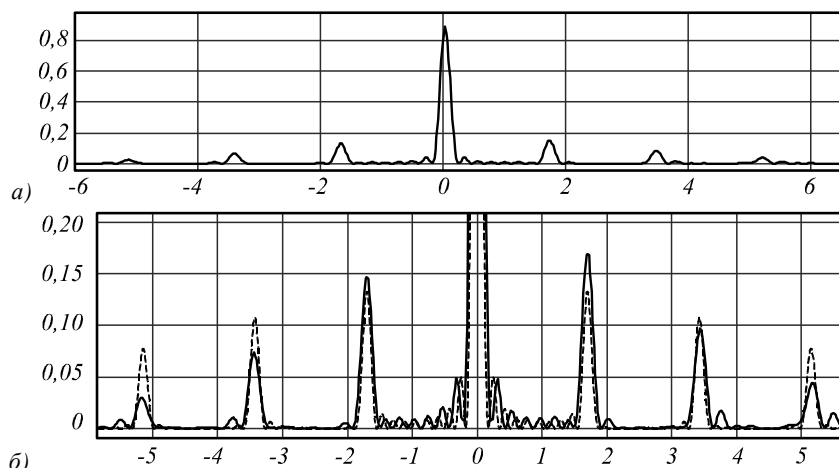


Рис. 6. Распределение интенсивности по порядкам в дальней зоне дифракции от фазовой структуры, представленной на рис. 5 (а), то же распределение интенсивности по порядкам в дальней зоне дифракции от амплитудной структуры, представленной на рис. 5б в сравнении с распределением от идеальной решетки (пунктирная линия) (б)

Величины среднеквадратичных отклонений для распределений интенсивности в 0,26 и 0,21 соответственно для амплитудной и фазовой решеток не критичны, если исходить из структуры получившихся распределений (наблюдается практически идеальное совпадение положения дифракционных порядков). Таким образом, продемонстрирована работоспособная технология для формирования дифракционных структур с минимальным размером элемента 0,25 мкм.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 14-07-00177, 16-29-09528, 16-29-11744, 16-07-00825.

Литература

1. **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 A*. – 2007. – Vol. 89(1). – P. 161-163. – DOI: 10.1007/s00339-007-4158-7.
2. **Tan, B.** High repetition rate femtosecond laser nanomachining of thin films / B. Tan, A. Dalili, K. Venkatarishnan // *Applied Physics A*. – 2009. – Vol. 95(2). – P. 537-545. – DOI: 10.1007/s00339-008-4938-8.
3. **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.
4. **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 (5 p.). – DOI: 10.1051/epjpv/2012013.
5. **Ihlemann, J.** Fabrication of diffractive phase elements for the UV-range by laser ablation patterning of dielectric layers / J. Ihlemann, D. Schafer // *Applied Surface Science*. – 2002. – Vol. 197/198. – P. 856-861. – DOI: 10.1016/S0169-4332(02)00462-2.
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, H.P. Huber // *Applied Physics A: Materials Science & Processing*. – 2011. – Vol. 102, Issue 1. – P. 173-178. – DOI: 10.1007/s00339-010-5993-5.
7. **Bauerle, D.** Laser chemical processing: an overview to the 30th anniversary / D. Bauerle // *Applied Physics A: Materials Science & Processing*. – 2010. – Vol. 101, Issue 2. – P. 447-459. – DOI: 10.1007/s00339-010-5837-3.
8. **Алфёров, С.В.** О возможности управления лазерной абляцией при острой фокусировке фемтосекундного излучения / С.В. Алфёров, С.В. Карпеев, С.Н. Хонина, К.Н. Тукмаков, О.Ю. Моисеев, С.А. Шуляпов, К.А. Иванов, А.Б. Савельев-Трофимов // *Квантовая электроника*. – 2014. – Т. 44, № 11. – С. 1061-1065.
9. **Заярный, Д.А.** Наномасштабные процессы кипения при одноимпульсной фемтосекундной лазерной абляции золотых плёнок / Д.А. Заярный, А.А. Ионин, С.И. Кудряшов, А.А. Руденко, С.Г. Бежанов, С.А. Урюпин, А.П. Канавин, В.И. Емельянов, С.В. Алферов, С.Н. Хонина, С.В. Карпеев, А.А. Кучмижак, О.Б. Витрик, Ю.Н. Кульчин, С.В. Макаров // *Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики*. – 2015. – Т. 101, № 6. – С. 428-432. – DOI: 10.7868/S0370274X15060077.
10. **Волков, А.В.** Высокорастворяющая лазерная запись контактных масок на плёнках молибдена для изготовления элементов дифракционной оптики / А.В. Волков, О.Ю. Моисеев, С.Д. Поletaев // *Компьютерная оптика*. – 2013. – Т. 37, № 2. – С. 220-225.
11. **Волков, А.В.** Применение тонких плёнок молибдена для контактных масок при изготовлении микрорельефов элементов дифракционной оптики / А.В. Волков,

- О.Ю. Моисеев, С.Д. Полетаев, И.В. Чистяков // Компьютерная оптика. – 2014. – Т. 38, № 4. – С. 757-762.
12. **Волков, А.В.** Особенности процесса воздействия лазерного излучения на тонкие плёнки молибдена / А.В. Волков, Н.Л. Казанский, О.Ю. Моисеев, В.Д. Паранин, С.Д. Полетаев, И.В. Чистяков // Журнал технической физики. – 2016. – Т. 86, № 4. – С. 101-105.
 13. **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. Korolov, A.A. Kharissov, V.V. Cherkashin, V.P. Kiryanov, A.V. Kiryanov, S.A. Kokarev, A.G. Verhoglyad // Applied Optics. – 1999. – Vol. 38, Issue 8. – P. 1295-1301.
 14. **Kazanskiy, N.L.** Research & Education Center of Diffractive Optics / N.L. Kazanskiy // Proceedings of SPIE. – 2012. – Vol. 8410. – 84100R. – DOI: 10.1117/12.923233.
 15. **Doskolovich, L.L.** Software on diffractive optics and computer generated holograms / L.L. Doskolovich, M.A. Golub, N.L. Kazanskiy, A.G. Khramov, V.S. Pavelyev, P.G. Seraphimovich, V.A. Soifer, S.G. Volotovskiy // Proceedings of SPIE. – 1995. – Vol. 2363. – P. 278-284. – DOI: 10.1117/12.199645.
 16. **Хонина, С.Н.** Алгоритмы быстрого расчета дифракции радиально-вихревых лазерных полей на микроапертуре / С.Н. Хонина, А.В. Устинов, С.Г. Волотовский, М.А. Ананьин // Известия Самарского научного центра РАН. – 2010. – Т. 12, № 4. – С. 15-25
 17. **Khonina, S.N.** Near-field propagation of vortex beams: models and computation algorithms / S.N. Khonina, A.V. Ustinov, A.A. Kovalyov, S.G. Volotovskiy // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). – 2014. – Vol. 23, Issue 2. – P. 50-73. – DOI: 10.3103/S10660992X14020027.
 18. **Казанский, Н.Л.** Моделирование работы космического гиперспектрометра, основанного на схеме Оффнера / Н.Л. Казанский, С.И. Харитонов, Л.Л. Досколович, А.В. Павельев // Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39, № 1. – С. 70-76. – DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-1-70-76.
 19. **Карпеев, С.В.** Исследование дифракционной решётки на выпуклой поверхности как диспергирующего элемента / С.В. Карпеев, С.Н. Хонина, С.И. Харитонов // Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39, № 2. – С. 211-217. – DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-2-211-217.

Сведения об авторах

Полетаев Сергей Дмитриевич, 1985 года рождения, окончил Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет) (ныне Самарский университет) по специальности «Проектирование и технология радиоэлектронных средств», работает инженером в Самарском университете, аспирант кафедры нанотехнологий, стажер-исследователь ИСОИ РАН – филиала ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН. Область научных интересов: технология создания дифракционных оптических элементов. E-mail: sergpolet@gmail.com.

Сведения об авторе **Волотовский Сергей Геннадьевич** см. стр. 336 этого номера.

ГРПТИ: 29.31.15, 29.31.29.

Поступила в редакцию 2 июня 2016 г. Окончательный вариант – 24 июня 2016 г.

PRECISION LASER RECORDING OF MICROSTRUCTURES ON MOLYBDENUM FILMS FOR GENERATING A DIFFRACTIVE MICRORELIEF

S.D. Poletaev^{1,2}, S.G. Volotovskiy¹

¹ Image Processing Systems Institute of RAS, – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS, Samara, Russia

² Samara National Research University, Samara, Russia

Abstract

We discuss a problem of reducing the thickness of lines of the contact pattern masks produced by laser ablation of thin films of refractory metals and used when synthesizing the micro-relief of diffractive optical elements (DOEs). For a contact mask for a DOE on molybdenum, patterns with features in the range 0.25-0.3 μm were recorder by laser ablation on 40-nm thick films. This is approximately 3 times smaller than the characteristic dimensions obtained by thermochemical recording chromium films of the same thickness in the standard process. A microrelief of height of up to 300 nm was formed in a quartz substrate by reactive ion etching in an inductively coupled plasma through the mask. We show that thin molybdenum films can have promising applications as metallic masks when synthesizing a DOE microrelief.

Keywords: diffractive microrelief, metallic mask, laser ablation, thermochemical recording, molybdenum film, reactive ion etching.

Citation: Poletaev SD, Volotovskiy SG. Precision laser recording of microstructures on molybdenum films for generating a diffractive microrelief. Computer Optics 2016; 40(3): 422-6. – DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-3-422-426.

Acknowledgements: The work was funded the Russian Foundation for Basic Research grants ## 14-07-00177, 16-29-09528, 16-29-11744.

References

- [1] Zoppel S, Huber H, Reider GA. Selective ablation of thin Mo and TCO films with femtosecond laser pulses for structuring thin film solar cells. *Appl Phys A* 2007; 89(1): 161-163. DOI: 10.1007/s00339-007-4158-7.
- [2] Tan B, Dalili A, Venkatakrishnan K. High repetition rate femtosecond laser nano-machining of thin films. *Appl Phys A* 2009; 95(2): 537-545. DOI: 10.1007/s00339-008-4938-8.
- [3] Wang XC, Wu LYL, Shao Q, Zheng HY. 355 nm DPSS UV laser surface texturing on Si substrate. SIMTech technical reports 2009; 10(4): 203-208.
- [4] Krause S, Miclea T, Steudel F, Schweizer S, Seifert G. Precise microstructuring of indium-tin oxide thin films on glass by selective femtosecond laser ablation. *EPJ Photovoltaics* 2013; 4: 40601. DOI: 10.1051/epjpv/2012013.
- [5] Ihlemann J, Schafer D. Fabrication of diffractive phase elements for the UV-range by laser ablation patterning of dielectric layers. *Applied Surface Science* 2002; 197: 856-861. DOI: 10.1016/S0169-4332(02)00462-2.
- [6] Heise G., Englmaier M, Hellwig C, Kuznicki T, Sarrach S, Huber HP. Laser ablation of thin molybdenum films on transparent substrates at low fluences. *Appl Phys A: Materials Science & Processing* 2011; 102(1): 173-178. DOI: 10.1007/s00339-010-5993-5.
- [7] Bauerle D. Laser chemical processing: an overview to the 30th anniversary. *Appl Phys A: Materials Science & Processing* 2010; 101(2): 447-459. DOI: 10.1007/s00339-010-5837-3.
- [8] Alferov SV, Karpeev SV, Khonina SN, Tukmakov KN, Moiseev OYu, Shulyapov SA, Ivanov KA, Savel'ev-Trofimov AB. On the possibility of controlling laser ablation by tightly focused femtosecond radiation. *Quantum Electronics* 2014; 44(11): 1061-1065. DOI: <http://dx.doi.org/10.1070/QE2014v044n11ABEH015471>.
- [9] Zayarny DA, Ionin AA, Kudryashov SI, Makarov SV, Rudenko AA, Bezhanov SG, Uryupin SA, Kanavin AP, Emel'yanov VI, Alferov SV, Khonina SN, Karpeev SV, Kuchmizhak AA, Vitrik OB, Kulchin YuN. Nanoscale boiling during single-shot femtosecond laser ablation of thin gold films. *JETP Letters* 2015; 101(6): 394-397. DOI: 10.1134/S0021364015060132.
- [10] Volkov AV, Moiseev OYu, Poletaev SD. Precision laser recording on a molybdenum films for diffractive microrelief formation. *Computer Optics* 2013; 37(2): 220-225.
- [11] Volkov AV, Moiseev OYu, Poletaev SD, Chistyakov IV. Application of thin molybdenum films in contact masks for manufacturing the micro-relief of diffractive optical elements. *Computer Optics* 2014; 38(4): 757-762.
- [12] Volkov AV, Kazanskiy NL, Moiseev OY, Parandin VD, Poletaev SD, Chistyakov IV. Specific features of the laser irradiation of thin molybdenum films. *Technical Physics* 2016; 61(4): 579-583. DOI: 10.1134/S1063784216040241.
- [13] Poleshchuk AG, Churin EG, Koronkevich VP, Korolkov VP, Kharissov AA, Cherkashin VV, Kiryanov VP, Kiryanov AV, Korkarev SA, Verhoglyad AG. Polar coordinate laser pattern generator for fabrication of diffractive optical elements with arbitrary structure. *Appl Opt* 1999; 38(8): 1295-1301.
- [14] Kazanskiy NL. Research & Education Center of Diffractive Optics. *Proceedings of SPIE* 2012; 8410: 84100R. DOI: 10.1117/12.923233.
- [15] Doskolovich LL, Golub MA, Kazanskiy NL, Khramov AG, Pavelyev VS, Seraphimovich PG, Soifer VA, Volotovskiy SG. Software on diffractive optics and computer generated holograms. *Proceedings of SPIE* 1995; 2363: 278-284. DOI: 10.1117/12.199645.
- [16] Khonina SN, Ustinov AV, Volotovskiy SG, Ananin MA. Fast calculation algorithms for diffraction of radially vortical laser fields on the microaperture. *Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences* 2010; 12(4): 15-25.
- [17] Khonina SN, Ustinov AV, Kovalyov AA, Volotovskiy SG. Near-field propagation of vortex beams: models and computation algorithms. *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics)* 2014; 23(2): 50-73.
- [18] Kazanskiy NL, Kharitonov SI, Doskolovich LL, Pavelyev AV. Modeling the performance of a spaceborne hyperspectrometer based on the Offner scheme. *Computer Optics* 2015, 39(1): 70-76. DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-1-70-76.
- [19] Karpeev SV, Khonina SN, Kharitonov SI. Study of the diffraction grating on the convex surface as a dispersive element. *Computer Optics* 2015; 39(2): 211-217.

Authors' information

Sergey Dmitriyevich Poletayev, (b.1985) graduated from S. P. Korolyov Samara State Aerospace University (National Research University) (SSAU) in the specialty «Design and Technology of Radioelectronic Facilities». He is a post-graduate student at Samara National Research University Nanoengineering sub-department, also working as an engineer at Samara National Research University and a trainee researcher at the Image Processing Systems Institute of RAS, – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS. Area of research interests: development of technology of diffractive optical elements E-mail: sergpolet@gmail.com.

The information about author **Sergey Gennadjevich Volotovskiy** you can find on page 337 of this issue.

Received June 2, 2016. The final version – June 24, 2016.

Дизайн: Я.Е. Тахтаров. Оформление и верстка: М.А. Вахе, С.В. Смагин и Я.Е. Тахтаров.

Подписано в печать 27.06.2016 г. Усл. печ. л. 14,55.
Отпечатано в типографии ООО «Предприятие «Новая техника».
Заказ № 11/3. Тираж 319 экз. Печать офсетная. Формат 62x84 1/8.