

Лазерные технологии в формировании микрорельефов гармонических линз

В.А. Данилов¹

¹Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Бутлерова 15, Москва, Россия, 117342

Аннотация. Кратко рассказывается о технологии формирования высоких микрорельефов в контексте научного пути старшего научного сотрудника Института систем обработки изображений РАН кандидата технических наук Олега Юрьевича Моисеева – уникального специалиста в технологиях дифракционной компьютерной оптики, записи оптических микро- и нано-рельефов.

1. Введение

С появлением оптических квантовых генераторов в руки технологов попал мощный инструмент для проведения уникальных технологических процессов локального энергетического воздействия с уровнями мощности, достаточными как для термообработки, так и для локального воздействия на фочувствительные композиции. Обычно размеры сечения излучения лазеров имеют достаточно большие размеры, порядка нескольких миллиметров, но в сфокусированном состоянии возможно формирование деталей размером меньше микрометра. Несмотря на то, что традиционная оптика способна решать достаточно широкий круг задач, становится очевидно, что в ряде случаев рефракционные линзы начинают уступать дифракционной оптике.

Трудами И.Н. Сисакяна и В.А. Сойфера с соавторами в первой половине 80-х годов получены основные геометрооптические решения задачи фокусировки для различных фокальных областей и созданы разнообразные фокусирующие дифракционные оптические элементы (ДОЭ) [1-3]. Ключевой проблемой при создании элементов дифракционной оптики является одновременное достижение высокой энергетической эффективности и требуемого распределения интенсивности в рабочей области. В частности, недостаточная дифракционная эффективность сдерживает применение фокусаторов в лазерных технологических установках. Следует отметить, что практически все работы по теоретической оценке эффективности оптических элементов сделаны в предположении идеальной или почти идеальной точности изготовления микрорельефов. В реальном случае, безусловно, имеют место технологические погрешности изготовления как по размерам зон ДОЭ, так и по высоте микроструктур, что особенно характерно для широкоапертурных силовых фокусаторов. В вышеперечисленных работах исследуются теоретические вопросы построения дифракционных элементов, чего нельзя сказать о технологической подготовке производства. Так, например, изготовление ДОЭ из традиционных материалов и традиционными методами не позволяет полностью реализовать потенциал дифракционной оптики: невозможно получать без чрезмерных затрат непрерывные или почти непрерывные рельефы, необходимые для построения оптических элементов.

Разработка технологий изготовления ДОЭ с непрерывным микрорельефом неразрывно связана с именем старшего научного сотрудника Института систем обработки изображений РАН кандидата технических наук Олега Юрьевича Моисеева (6 января 1959 г. – 29 июля 2016 г.) [4].

2. Технологии изготовления непрерывных ДОЭ

С начала научной карьеры О.Ю. Моисеев занимается методами формирования микрорельефов ДОЭ с использованием фоторезистов и фотополимерных композиций. Если технологии формирования бинарного микрорельефа довольно просто заимствовались из микроэлектроники, то для формирования многоуровневых микрорельефов нужно было разрабатывать принципиально новые технологические операции. О.Ю. Моисеевым был разработан уникальный метод формирования дифракционного микрорельефа, основанный на послойном наращивании фоторезиста [5-6]. Этот метод позволяет без использования операции травления формировать многоуровневый (до 16 уровней) микрорельеф для отражающих фокусаторов, предназначенных для концентрации излучения CO_2 -лазеров (длина волны 10,6 мкм) (рис.1).



Рисунок 1. Фотография фокусатора [6].

В 1996 году О.Ю. Моисеевым этим методом изготовлены фокусаторы в кольцо [7-8], которые работают в Институте общей физики имени А.М. Прохорова РАН в установке пьедестал [9] до сих пор и позволяют выращивать уникальные кристаллические волокна [10-11].

О.Ю. Моисеев также исследовал ограничения метода темного роста микрорельефа в жидких фотополимеризующихся композициях [12]. Метод темного роста позволил получить «высокие» микрорельефы длиннофокусных гармонических линз. Разработанные О.Ю. Моисеевым в его кандидатской диссертации методы позволили впоследствии создать и запатентовать ряд оптических устройств и технологических приемов [13-22].

Интересные работы выполнены О.Ю. Моисеевым по созданию, исследованию и оптимизации полуавтоматической установки для формирования микрорельефов на торцах галогенидных ИК-волноводов [23-31] (рис. 2).

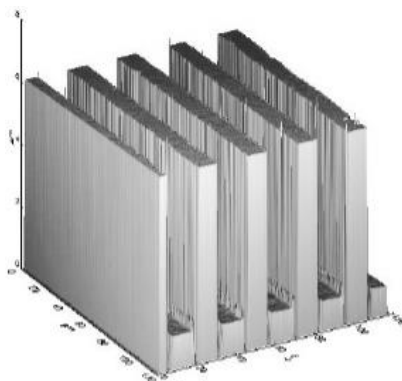


Рисунок 2. Трехмерная реконструкция формы микрорельефа на торце галогенидного ИК волновода [26].

Новым этапом в разработке технологий формирования многоуровневых микрорельефов стало для Олега Юрьевича появление в 2004 году в центре коллективного пользования оборудованием Самарского университета и ИСОИ РАН станции лазерной записи [32-34]. Благодаря использованию технологии прямой лазерной записи фотошаблонов О.Ю. Моисееву удалось создать и исследовать множество новых дифракционных элементов [35-49] (рис.3).

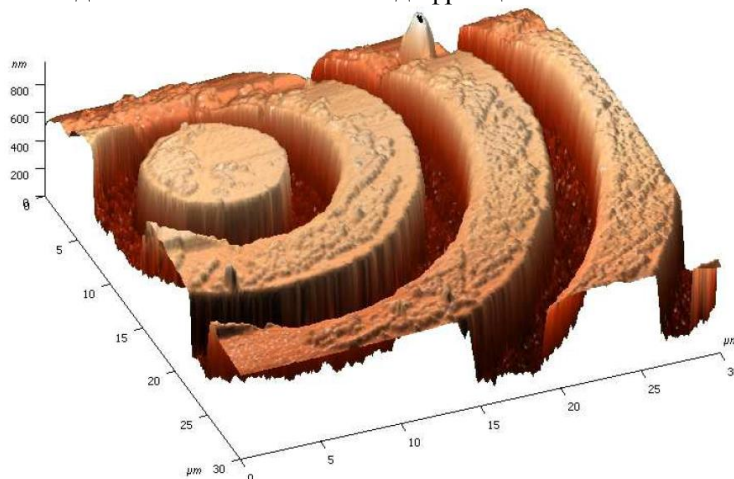


Рисунок 3. Центральная часть аксикона с периодом 8μм.

С 2008 года О.Ю. Моисеев ведет разработку принципиально новой одностадийной технологии изготовления дифракционных оптических элементов, основанной на процессе окисления тонких пленок хрома, меди и молибдена в сфокусированном лазерном пучке [50-61]. В результате появляются методы, позволяющие формировать микрорельеф за одну стадию на основе получения структур из оксида хрома или молибдена заданной высоты (рис.4).

С 2015 года Олег Юрьевич вел разработку технологии, позволяющей получать высококачественный микрорельеф гармонических линз видимого диапазона [62]. По точности воспроизведения «высокого» микрорельефа (завал края, вертикальность стенок и т.п.) достигнутые О.Ю. Моисеевым результаты существенно превосходят получаемые ранее методом темного роста жидких фотополимеризующихся композиций [12] или на станках с числовым программным управлением [63]. Это открыло принципиально новые возможности для использования гармонических линз в сверхлегких системах технического зрения [64-65].

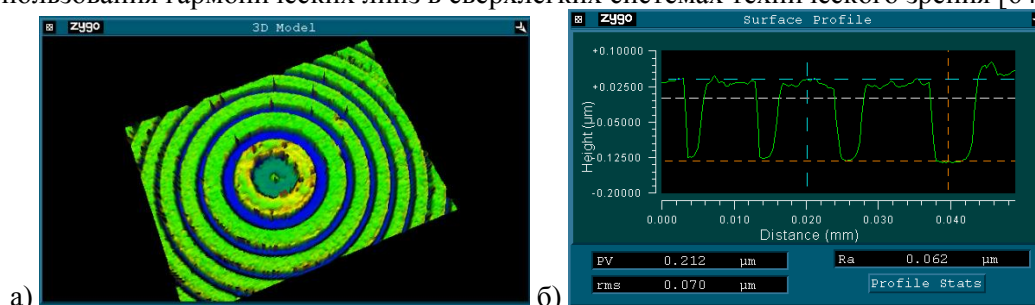


Рисунок 4. Трехмерная реконструкция поверхности микрорельефа (а) и профилограмма аксикона (б), изготовленного методом окисления пленки хрома.

Несмотря на скоростную смерть О.Ю. Моисеева продолжают выходить научные публикации, посвященные разработанным им технологиям. Так в [66] описана технология изготовления микротурбин методом прямой лазерной записи по толстому слою фоторезиста (рис. 5).

Таким образом, разработанные Олегом Юрьевичем технологии нашли свое применение в микромеханике.

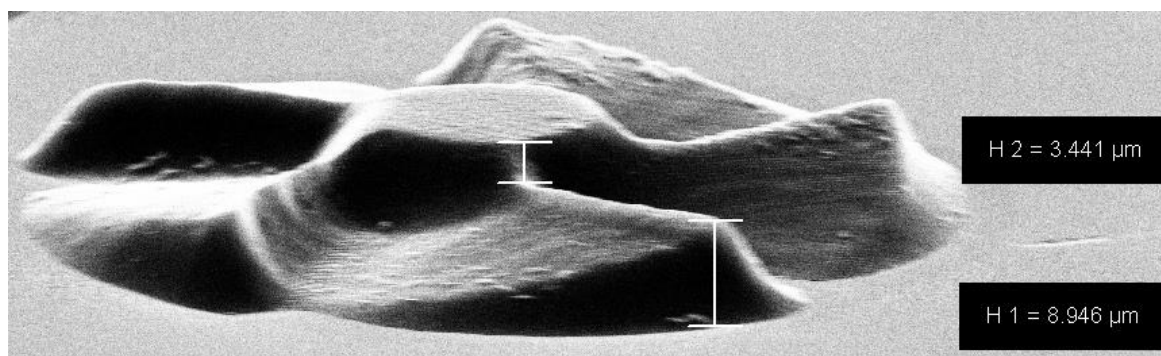


Рисунок 5. Форма поверхности микротурбины, полученная на растровом электронном микроскопе Supra [66].

3. Заключение

Длительная эволюция методов формирования многоуровневых микрорельефов, которая была начата еще в конце прошлого века, привела к созданию совершенных и практически важных технологий для изображающих систем и не только. Лазерные технологии изготовления высоких многоуровневых микрорельефов, разработанные О.Ю. Моисеевым, дают возможность в ближайшее время совершить качественный рывок в развитии таких важных разделов науки, как системы технического зрения, микромеханика, оптоволоконная связь.

4. Литература

- [1] Голуб, М.А. Фокусировка когерентного излучения в заданную область пространства с помощью синтезированных на ЭВМ голограмм / М.А. Голуб, С.В. Карпеев, А.М. Прохоров, И.Н. Сисакян, В.А. Соيفер // Письма в ЖТФ. – 1981. – Т. 7, № 10. – С. 618-623.
- [2] Голуб, М.А. Машинный синтез фокусирующих элементов для CO₂ лазера / М.А. Голуб, В.П. Дегтярев, А.Н. Климов, В.В. Попов, А.М. Прохоров, Е.В. Сисакян, И.Н. Сисакян, В.А. Соифер // Письма в ЖТФ. – 1982. – Т. 8, № 8. – С. 449-451.
- [3] Гончарский, А.В. Фокусаторы лазерного излучения, падающего под углом / А.В. Гончарский, В.А. Данилов, В.В. Попов, А.М. Прохоров, И.Н. Сисакян, В.А. Соифер, В.В. Степанов // Квантовая электроника. – 1984. – Т. 11, № 1. – С. 166-168.
- [4] Sokolov, V.O. The maker of harmonic lens microreliefs // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 201. – P. 177-183.
- [5] Волков, А.В. Метод формирования дифракционного микрорельефа на основе послойного наращивания фоторезиста / А.В. Волков, Н.Л. Казанский, О.Ю. Моисеев, В.А. Соифер // Компьютерная оптика. – 1996. – Т. 16. – С. 12-14.
- [6] Volkov, A.V. A Method for the Diffractive Microrelief Formation Using the Layered Photoresist Growth / A.V. Volkov, N.L. Kazanskiy, O.Ju. Moiseyev, V.A. Soifer // Optics and Lasers in Engineering. – 1998. – Vol. 29(4-5). – P. 281-288.
- [7] Голуб, М.А. Дифракционный расчет оптического элемента, фокусирующего в кольцо / М.А. Голуб, Н.Л. Казанский, И.Н. Сисакян, В.А. Соифер, С.И. Харитонов // Автометрия. – 1987. – Т. 6. – С. 8-15.
- [8] Казанский, Н.Л. Исследование дифракционных характеристик фокусатора в кольцо методом вычислительного эксперимента // Компьютерная оптика. – 1992. – № 10-11. – С.128-144.
- [9] Буфетов, Г.А. Твердотельные неодимовые лазеры на основе монокристаллических волокон с поперечным градиентом показателя преломления / Г.А. Буфетов, В.В. Кашин, Д.А. Николаев, С.Я. Русанов, В.Ф. Серегин, В.Б. Цветков, И.А. Щербаков, А.А. Яковлев // Квантовая электроника. – 2006. – Т. 36, № 7. – С. 616619.

- [10] Iskhakova, L.D. Facet appearance on the lateral face of sapphire single-crystal fibers during LHPG growth / L.D. Iskhakova, V.V. Kashin, S.V. Lavrishchev, S.Y. Rusanov, V.F. Seregin, V.B. Tsvetkov // *Crystals*. – 2016. – Vol. 6(9). DOI: 10.3390/cryst6090101.
- [11] Bufetova, G.A. Temperature distribution across the growth zone of sapphire (Al₂O₃) and yttrium-aluminum garnet (YAG) single crystal fibers / G.A. Bufetova, S.Ya. Rusanov, V.F. Seregin, Yu.N. Pyrkov, V.A. Kamynin, V.B. Tsvetkov // *Journal of Crystal Growth*. – 2016. – Vol. 433. – P. 54-58. DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2015.06.010.
- [12] Волков, А.В. Экспериментальное исследование массопереноса в жидких фотополимеризующихся композициях / А.В. Волков, С.Г. Волотовский, В.М. Гранчак, Н.Л. Казанский, В.С. Соловьев, О.Ю. Моисеев, В.А. Сойфер, Д.М. Якуненкова // *Журнал технической физики*. – 1995. – Т. 65, № 9. – С. 181-185.
- [13] Волков, А.В. Дифракционные оптические элементы в приборах ночного видения / А.В. Волков, Н.Л. Казанский, О.Ю. Моисеев, С.И. Харитонов // *Научно-исследовательские разработки и высокие технологии двойного применения*. Самара: ГПСО "Импульс". – 1995. – Т.1. – С. 129-130.
- [14] Волков, А.В. Способ формирования диаграммы направленности осветительных устройств транспортных средств / А.В. Волков, Н.Л. Казанский, О.Ю. Моисеев, В.А. Сойфер // Патент РФ № 2094256 от 11.08.94 г.
- [15] Волков, А.В. Устройство для наблюдения в видимой и инфракрасной областях спектра / А.В. Волков, Н.Л. Казанский, О.Ю. Моисеев, В.А. Сойфер // Патент РФ № 2148849 от 18.07.1997.
- [16] Волков, А.В. Исследование процессов нанесения и травления фоторезиста с целью повышения точности формирования микрорельефа широкоапертурных ДОЭ / А.В. Волков, Н.Л. Казанский, О.Ю. Моисеев // *Компьютерная оптика*. – 1999. – Т. 19. – С. 143-146.
- [17] Волков, А.В. Бинарный дифракционный оптический элемент для фокусировки гауссового пучка в продольный отрезок / А.В. Волков, В.В. Котляр, О.Ю. Моисеев, О.Е. Рыбаков, Р.В. Скиданов, В.А. Сойфер, С.Н. Хонина // *Оптика и спектроскопия*. – 2000. – Т. 89, № 2. – С. 347-352.
- [18] Волков, А.В. Подготовка поверхности подложек для изготовления ДОЭ методом послойного наращивания фоторезиста / А.В. Волков, Н.Л. Казанский, О.Ю. Моисеев // *Компьютерная оптика*. – 2001. – Т. 21. – С. 113-116.
- [19] Волков, А.В. Формирование микрорельефа с использованием халькогенидных стеклообразных полупроводников / А.В. Волков, Н.Л. Казанский, О.Ю. Моисеев // *Компьютерная оптика*. – 2002. – Т. 24. – С. 74-77.
- [20] Волков, А.В. Способ изготовления дифракционных оптических элементов на алмазных и алмазоподобных пленках / А.В. Волков, Н.Л. Казанский, О.Ю. Моисеев, В.А. Сойфер // Патент РФ на изобретение № 2197006 от 27.03.2001.
- [21] Волков, А.В. Устройство направленного излучения / А.В. Волков, Н.Л. Казанский, О.Ю. Моисеев, В.А. Сойфер, С.И.Харитонов // Патент РФ на изобретение № 2213985 от 05.04.2002.
- [22] Волков, А.В. Способ изготовления дифракционных оптических элементов / А.В. Волков, Н.Л. Казанский, О.Ю. Моисеев // Патент РФ на изобретение № 2231812 от 21.05.2002.
- [23] Бородин, С.А. Численное и экспериментальное исследование бездисперсионных многомодовых пучков, формируемых с помощью ДОЭ / С.А. Бородин, А.В. Волков, Н.Л. Казанский, В.С. Павельев, С.В. Карпеев, А.Н. Палагушкин, С.А. Прокопенко, А.П. Сергеев, А.Н. Арламенков // *Компьютерная оптика*. – 2005. – Т. 27. – С. 41-44.
- [24] Бородин, С.А. Формирование и исследование дифракционного микрорельефа на торце галогенидного ИК волновода / С.А. Бородин, А.В. Волков, Н.Л. Казанский, В.С. Павельев, С.В. Карпеев, А.Н., О.Ю. Моисеев, Д.М. Якуненкова, Ю.А. Рунков, Д.Л. Головашкин // *Компьютерная оптика*. – 2005. – Т. 27. – С. 45-49.
- [25] Волков, А.В. Исследование погрешностей формирования дифракционной решетки на торце галогенидного ИК-волновода / А.В. Волков, Д.Л. Головашкин, В.А. Ерополов, Н.Л.

- Казанский, С.В. Карпеев, О.Ю. Моисеев, В.С. Павельев, В.Г. Артюшенко, В.В. Кашин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2006. – Т. 8, № 4. – С. 1211-1217.
- [26] Volkov, A.V. Studying Fabrication Errors of the Diffraction Grating on the End Face of a Silver-Halide Fiber / A.V. Volkov, D.L. Golovashkin, V.A. Erolov, N.L. Kazanskiy, S.V. Karpeev, O.Yu. Moiseev, V.S. Pavelyev, V.G. Artyushenko, V.V. Kashin // *Optical Memory & Neural Networks (Information Optics)*. – 2007. – Vol. 16(4). – P. 263-268.
- [27] Орехова, Ю.А. Выбор геометрических параметров профиля галогенидной антиотражающей решетки с учетом возможностей технологии травления / Ю.А. Орехова, О.Ю. Моисеев, Д.Л. Головашкин // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2008. – Т. 2, № 15. – С. 112-116.
- [28] Моисеев, О.Ю. Полуавтоматическая установка для формирования микрорельефов на торцах галогенидных ИК-волноводов // Компьютерная оптика. – 2008. – Т. 32, № 1. – С. 62-63.
- [29] Володкин, Б.О. Моделирование распространения излучения через антиотражающую решетку, сформированную по технологии штамповки на торец галогенидного ИК-волновода / Б.О. Володкин, Д.Л. Головашкин, О.Ю. Моисеев, Ю.А. Орехова, В.С. Павельев // Компьютерная оптика. – 2008. – Т. 32, № 2. – С. 191-194.
- [30] Pavelyev, V.S. Realization and investigation of diffractive microrelief on the end face of silver-halide waveguide / V.S. Pavelyev, O.Yu. Moiseev, A.V. Volkov, V.A. Erolov, S.V. Dmitriev, S.V. Karpeev, V.G. Artyushenko, V.V. Kashin // *Proceedings of SPIE*. – 2008. – Vol. 6994. – P. 69940Q.
- [31] Golovashkin, D.L. Choosing the geometry of a halogenide antireflection grating profile based on etching technique capabilities / D.L. Golovashkin, O.Y. Moiseev, E.A. Yegorova, G.A. Yunusheva // *Optical Memory & Neural Networks (Information Optics)*. – 2009. – Vol. 18(4). – P. 268-270.
- [32] Poleshchuk, A.G. Polar coordinate laser pattern generator for fabrication of diffractive optical elements with arbitrary structure / A.G. Poleshchuk, E.P. Churin, V.P. Koronkevich, V.P. Korolkov, A.V. Kharissov, V.P. Cherkashin, V.P. Kiryanov, A.A. Kiryanov, S.G. Kokarev, A. Verhoglyad // *Applied Optics*. – 1999. – Vol. 38(8). – P. 1295-1301.
- [33] Казанский, Н.Л. Исследовательско-технологический центр дифракционной оптики // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2011. – Т. 13, № 4. – С. 54-62.
- [34] Верхогляд, А.Г. Круговая лазерная записывающая система для изготовления ДОЭ на сферических поверхностях / А.Г. Верхогляд, М.А. Завьялова, Л.Б. Касторский, А.Е. Качкин, С.А. Кокарев, В.П. Корольков, О.Ю. Моисеев, А.Г. Полещук, Р.В. Шиманский // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2015. – Т. 5, № 2. – С. 62-68.
- [35] Kotlyar, V.V. Diffraction of a finite-radius plane wave and a Gaussian beam by a helical axicon and a spiral phase plate / V.V. Kotlyar, A.A. Kovalev, R.V. Skidanov, O.Yu. Moiseev, V.A. Soifer // *Journal of the Optical Society of America A: Optics, Image Science, and Vision*. – 2007. – Vol. 24(7). – P. 1955-1964.
- [36] Kotlyar, V.V. Simple optical vortices formed by spiral phase plate / V.V. Kotlyar, A.A. Kovalev, R.V. Skidanov, S.N. Khonina, O.Yu. Moiseev, V.A. Soifer // *Journal of Optical Technology*. – 2007. – Vol. 74(10). – P. 686-693.
- [37] Хонина, С.Н. Формирование лазерных пучков Эйри с помощью бинарно-кодированных дифракционных оптических элементов для манипулирования микрочастицами / С.Н. Хонина, Р.В. Скиданов, О.Ю. Моисеев // Компьютерная оптика. – 2009. – Т. 33, № 2. – С. 138-146.
- [38] Карпеев, С.В. Высокоапертурный бинарный биаксикон для дальнего ИК-диапазона: изготовление и экспериментальное тестирование при линейной поляризации падающего излучения / С.В. Карпеев, С.Н. Хонина, А.В. Волков, О.Ю. Моисеев, Г.Ф. Костюк, Д.М. Якуненкова // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2010. – Т. 4, № 24. – С. 215-223.

- [39] Хонина, С.Н. Исследование формирования осевого отрезка с помощью оптимизированного бинарного ДОО / С.Н. Хонина, Р.В. Скиданов, Д.Г. Качалов, В.С. Павельев, О.Ю. Моисеев // Компьютерная оптика. – 2010. – Т. 34, № 3. – С. 350-359.
- [40] Котляр, В.В. Диаметр светового пятна в ближней зоне бинарного дифракционного микроаксикона / В.В. Котляр, С.С. Стафеев, Р.В. Скиданов, А.Г. Налимов, О.Ю. Моисеев, С.Д. Полетаев // Компьютерная оптика. – 2010. – Т. 34, № 1. – С. 24-34.
- [41] Kachalov, D.G. Stochastic optimization of radial DOE forming intensity distribution along an axial focal zone / D.G. Kachalov, V.S. Pavelyev, S.N. Khonina, R.V. Skidanov, O.Yu. Moiseev // Proceedings of SPIE. – 2010. – Vol. 7717. – P. 77170E.
- [42] Volostnikov, V.G. Light fields of complex polarization structure / V.G. Volostnikov, S.P. Kotova, O.Yu. Moiseev, A.V. Volkov, E.N. Vorontsov, D.M. Yakunenkov // Conference Proceedings - 5th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers. – 2010. – Vol. 5634258. – P. 74-75.
- [43] Карпеев, С.В. Формирование поляризационно-неоднородных лазерных пучков высокого порядка на основе пучков с круговой поляризацией / С.В. Карпеев, С.Н. Хонина, Н.Л. Казанский, О.Ю. Моисеев // Компьютерная оптика. – 2011. – Т. 35, № 2. – С. 224-230.
- [44] Kachalov, D.G. Application of the direct search in solving a problem of forming longitudinal distribution of intensity / D.G. Kachalov, V.S. Pavelyev, S.N. Khonina, R.V. Skidanov, O.Y. Moiseev // Journal of Modern Optics. – 2011. – Vol. 58(1). – P. 69-76.
- [45] Нестеренко, Д.В. Создание криволинейных дифракционных решеток для ультрафиолетового диапазона / Д.В. Нестеренко, С.Д. Полетаев, О.Ю. Моисеев, Д.М. Якуненкова, А.В. Волков, Р.В. Скиданов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2011. – Т. 13, № 4-1. – С. 66-71.
- [46] Карпеев, С.В. Поляризационный конвертор для формирования лазерных пучков высокого порядка с использованием бинарного дифракционного оптического элемента / С.В. Карпеев, С.Н. Хонина, О.Ю. Моисеев, С.В. Алферов, А.В. Волков // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Физико-математические науки. – 2012. – Т. 29, № 4. – С. 162-170.
- [47] Khonina, S.N. Study of polarization sensitivity of near-field microscope using a binary phase plate / S.N. Khonina, S.V. Alferov, S.V. Karpeev, O.Y. Moiseev // Computer Optics. – 2013. – Vol. 37(3). – P. 326-331.
- [48] Alferov, S.V. Experimental study of focusing of inhomogeneously polarized beams generated using sector polarizing plates / S.V. Alferov, S.V. Karpeev, S.N. Khonina, O.Y. Moiseev // Computer Optics. – 2014. – Vol. 38(1). – P. 57-64.
- [49] Khonina, S.N. Study of Focusing into Closely Spaced Spots Via Illuminating a Diffractive Optical Element by a Short-Pulse Laser Beam / S.N. Khonina, S.A. Degtyarev, A.P. Porfirev, O.Y. Moiseev, S.D. Poletaev, A.S. Larkin, A.B. Savelyev-Trofimov // Computer Optics. – 2015. – Vol. 39(2). – P. 187-196. DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-2-187-196
- [50] Волков, А.В. Тонкопленочная медь как маскирующий слой в процессе плазмохимического травления кварца / А.В. Волков, Б.О. Володкин, С.В. Дмитриев, В.А. Ерополов, О.Ю. Моисеев, В.С. Павельев // Компьютерная оптика. – 2007. – Т. 31, № 4. – С. 53-54.
- [51] Volkov, A.V. Thin Copper Film for Plasma Etching of Quartz / A.V. Volkov, V.S. Pavelyev, O.Yu. Moiseev, V.A. Eropolov, B.O. Volodkin, K.N. Tukmakov // Optical Memory & Neural Networks (Information Optics). – 2009. – Vol. 18(1). – P. 40-43.
- [52] Агафонов, А.Н. Анализ зависимости разрешающей способности технологии локального термохимического окисления от параметров структуры светочувствительной пленки хрома / А.Н. Агафонов, О.Ю. Моисеев, А.А. Корлюков // Компьютерная оптика. – 2010. – Т. 34, № 1. – С. 101-108.
- [53] Volkov, A.V. Precision laser recording on a molybdenum films for diffractive microrelief formation / A.V. Volkov, O.Y. Moiseev, S.D. Poletaev // Computer Optics. – 2013. – Vol. 37(2). – P. 220-225.

- [54] Alferov, S.V. On the possibility of controlling laser ablation by tightly focused femtosecond radiation / S.V. Alferov, S.V. Karpeev, S.N. Khonina, K.N. Tukmakov, O.Yu. Moiseev, S.A. Shulyapov, K.A. Ivanov, A.B. Savel'ev-Trofimov // *Quantum Electronics*. – 2014. – Vol. 44(11). – P. 1061-1065.
- [55] Volkov, A.V. Application of thin molybdenum films in contact masks for manufacturing the micro-relief of diffractive optical elements / A.V. Volkov, O.Y. Moiseev, S.D. Poletaev, I.V. Chistyakov // *Computer Optics*. – 2014. – Vol. 38(4). – P. 757-762.
- [56] Волков, А.В. Термоокислительная деструкция пленок молибдена при лазерной абляции / А.В. Волков, Н.Л. Казанский, О.Ю. Моисеев, С.Д. Полетаев // *Журнал технической физики*. – 2015. – Т. 85, № 2. – С. 107-111.
- [57] Казанский, Н.Л. Формирование микрорельефа методом термического окисления пленок молибдена / Н.Л. Казанский, О.Ю. Моисеев, С.Д. Полетаев // *Письма в Журнал технической физики*. – 2016. – Т. 42, № 3. – С. 106-110.
- [58] Волков, А.В. Особенности процесса воздействия лазерного излучения на тонкие пленки 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.
- [59] Juneja, S. Nanocrystalline silicon thin films and grating structures for solar cells / S. Juneja, S. Sudhakar, S.N. Khonina, R.V. Skidanov, A.P. Porfirev, O.Y. Moiseev, N.L. Kazanskiy, S. Kumar // *Proceedings of SPIE*. – 2016. – Vol. 9807. – P. 98070F.
- [60] Волков, А.В. Способ изготовления амплитудных дифракционных оптических элементов и масок для изготовления фазовых структур / А.В. Волков, Н.Л. Казанский, О.Ю. Моисеев, С.Д. Полетаев // Патент РФ на изобретение № 2556313 от 14.06.2013.
- [61] Ганчевская, С.В. Способ изготовления дифракционных оптических элементов / С.В. Ганчевская, Н.Л. Казанский, О.Ю. Моисеев, С.Д. Полетаев // Патент РФ на изобретение № 2601391 от 28.11.2014.
- [62] Skidanov, R.V. Additive process for fabrication of phased optical diffraction elements / R.V. Skidanov, O.Yu. Moiseev, S.V. Ganchevskaya // *Journal of Optical Technology*. – 2016. – Vol. 83(1). – P. 23-25. DOI: 10.1364/JOT.83.000023.
- [63] Abul'khanov, S.R. Manufacture of diffractive optical elements by cutting on numerically controlled machine tools / S.R. Abul'khanov, N.L. Kazanskiy, L.L. Doskolovich, O.Y. Kazakova // *Russian Engineering Research*. – 2011. – Vol. 31(12). – P. 1268-1272.
- [64] Blank, V.A. Hyperspectrometer based on a harmonic lens with diffraction grating / V.A. Blank, R.V. Skidanov // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2018. – Vol. 1096(1). – P. 012003.
- [65] Nikonorov, A.V. Toward Ultralightweight Remote Sensing with Harmonic Lenses and Convolutional Neural Networks / A.V. Nikonorov, M.V. Petrov, S.A. Bibikov, P.Y. Yakimov, V.V. Kutikova, Y.V. Yuzifovich, A.A. Morozov, R.V. Skidanov, N.L. Kazanskiy // *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. – 2018. – Vol. 11(9). – P. 3338-3348. DOI: 10.1109/JSTARS.2018.2856538.
- [66] Skidanov, R.V. Microturbines formed with the aid of direct laser recording on photoresist / R.V. Skidanov, O.Y. Moiseev, S.V. Ganchevskaya // *Technical Physics*. – 2018. – Vol. 63(6). – P. 862-865.

Laser technologies in the formation of harmonic lenses microreliefs

V.A. Danilov¹

¹Russian Academy of Sciences, Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation, Butlerova str. 15, Moscow, Russia, 117342

Abstract. Briefly describes the technology of forming high microreliefs in the context of the scientific path of a senior researcher at the Institute of Image Processing Systems of the Russian Academy of Sciences Candidate of Technical Sciences Oleg Yuryevich Moiseyev - a unique specialist in the technology of diffraction computer optics, recording optical micro- and nanorelief.