

УДК 621.373.8

**Р.В. Шиманский, В.Н. Хомутов,
Р.К. Насыров, В.П. Корольков, А.Г. Седухин**

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск, Россия

СТРУКТУРА, ПРИНЦИП РАБОТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЛИТОГРАФИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ СИНТЕЗА ПЛАНАРНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Представлены два сканирующих лазерных нанолитографа, разработанных в Институте автоматики и электрометрии СО РАН и работающих в прямоугольной и полярной системе координат. Описаны принципы работы данных нанолитографов, методы повышения их разрешающей способности, проанализированы перспективы и направления их развития. Продемонстрированы первые результаты записи регулярных тестовых решеток на пленках металлов.

Ключевые слова: сканирующий лазерный нанолитограф, дифракционные решетки, тонкие металлические пленки, термохимическая лазерная запись.

**R.V. Shimansky, V.N. Khomutov,
R.K. Nasyrov, V.P. Korolkov, A.G. Sedukhin**

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, Novosibirsk, Russia

STRUCTURE, OPERATING PRINCIPLE AND PERSPECTIVE DEVELOPMENT OF LITHOGRAPHIC SYSTEMS FOR SYNTHESIS OF PLANAR OPTICAL ELEMENTS

Presented are two scanning laser nanolithographs developed at the Institute of Automation and Electrometry SB RAS and operating in a rectangular and polar coordinate system. The principles of operation of these nanolithographs, methods for increasing their resolution are described, the prospects and directions of their development are analyzed. The first results of writing regular test gratings on metal films are demonstrated.

Keywords: scanning laser nanolithograph, diffraction gratings, thin metal films, thermochemical laser recording.

Введение

Разработка и исследование новых приборов и систем дифракционной и интегральной оптики, которые базируются на элементах с тонкослойными микро- и наноструктурами, требуют совершенствования технологической базы. Наиболее массовыми и доступными по стоимости являются планарные оптические элементы, на поверхности

которых формируются дифракционные и растровые компьютерно-синтезированные микро- и наноструктуры, а также структуры на основе синтезированных метаматериалов.

В последние годы большое развитие получили внеосевые и осесимметричные компьютерно-синтезированные голограммы для контроля и юстировки оптических систем, микроструктурированные оптические элементы с 3D-микрорельефом для сложных преобразований волновых фронтов и распределений интенсивности световых пучков (микрооптика), интегрально-оптические пассивные и активные схемы.

Следует отметить, что сложность записываемых микро- и наноструктур постоянно увеличивается, и современное технологическое оборудование постепенно выходит на предел своих возможностей, часто не обеспечивая на практике выполнение современных требований к точности, скорости и разрешающей способности записи. Это в полной мере относится к лазерным системам прямой сканирующей записи. Развитие алгоритмов записи и калибровки таких систем, а также использование новых оптических систем острой фокусировки и новых режимов записи позволяют частично нивелировать возникающие проблемы. Например, сокращение размеров сфокусированного лазерного пятна возможно при устранении остаточных аберраций оптики, применении высокоапертурных иммерсионных объективов записи, реализации режима записи через стекло (подложку записываемого оптического элемента), а также при применении специальных методов обострения лазерного пятна (уменьшение длины волны технологического лазера, использование кольцевой формы аподизации лазерного пучка и его радиальной поляризации). Важным фактором является также то, что использование спиральных алгоритмов записи может повысить на круговых лазерных записывающих системах скорость записи амплитудных зонных пластинок, описанных в работе [1]. Но зачастую интеграция подобных алгоритмов становится невозможной по причине несовместимости систем. Поэтому крайне важными становятся задачи развития программно-аппаратного комплекса лазерных сканирующих литографических систем. Также актуальными остаются задачи совершенствования оптических, механических и электронных узлов таких систем вместе с реализацией иммерсионного режима записи.

Необходимо иметь возможность дальнейшей модернизации отдельных узлов для постоянного повышения скорости записи, ее разре-

шающей способности, стабильности позиционирования лазерного луча по полю записи, а также для отработки программного обеспечения и технологических режимов.

В данной работе приводятся результаты развития модульного подхода с возможностью расширения и модернизации, на основе которого в Институте автоматики и электрометрии (ИАиЭ) СО РАН разрабатывается новое поколение лазерных нанолитографов.

Структура и принцип работы лазерных литографических систем

За последние годы в ИАиЭ СО РАН были разработаны два сканирующих лазерных нанолитографа, которые ориентированы на использование плоских подложек и технологии прямой записи остросфокусированным лазерным лучом по тонким пленкам металлов и фоторезистов.

На рис. 1, *a*, показана структурная схема первого экспериментального нанолитографа, работающего в прямоугольной системе координат [2]. Запись ведется ультрафиолетовым диодным лазерным модулем, работающим на длине волны 405 нм, мощностью 300 мВт. Лазер может осуществлять цифровую модуляцию с частотой от 0 до 100 МГц, что позволяет проводить запись как непрерывным, так и импульсным пучком. Аналоговая модуляция может осуществляться в полосе частот до 3 МГц, что позволяет использовать установку для записи многоуровневых элементов. Для управления модуляцией лазера был разработан цифровой векторный генератор, способный синхронизироваться по внешнему цифровому сигналу с подсистемой сканирования. Подсистема сканирования выполнена на базе двухкоординатного, прецизионного, моторизованного стола. Обратная связь по каждой из координат обеспечена применением прецизионных линейных энкодеров с нанометровым разрешением. Оптическая схема рассчитана для установки иммерсионного микрообъектива с числовой апертурой 1,23 (70x апохромат, ЛОМО) либо сухого объектива 100×0,9 (Olympus Mplan) с пьезодвигателем для фокусировки в заданную плоскость. Имеется возможность установки кольцевых диафрагм во входной апертуре объективов с целью дополнительного сокращения размеров сфокусированного пятна. Внешний вид нанолитографа приведен на рис. 1, *a*.

Структурная схема второго нанолитографа, работающего в полярной системе координат, показана на рис. 1, б. В этом случае система сканирования построена на базе прецизионного аэростатического шпинделя с установленным на него сверхточным угловым датчиком для обеспечения обратной связи. Радиальное сканирование обеспечивается линейным двигателем, который перемещает каретку с установленной на ней записывающей головкой. Обратную связь для линейного двигателя обеспечивает лазерный интерферометр перемещения с погрешностью измерения не более 1 нм. Подобная конфигурация использована в предыдущих разработках ИАиЭ СО РАН и КТИ НП СО РАН [3–7], а также в ряде зарубежных экспериментальных систем [8–10]. Запись элементов в разработанной установке может осуществляться на двух длинах волн – 266 и 532 нм. Записывающая головка состоит из схемы согласования лазерных пучков, приходящих из оптических каналов для 266 и 532 нм, объектива и системы автофокусировки. Описанная система позволяет производить запись микроструктур диаметром до 185 мкм. Использование отдельных оптических каналов, работающих на разных длинах волн, позволяет существенно расширить применимость системы для различных высокотехнологичных задач. В частности, использование оптического канала с длиной волны 266 нм позволяет производить запись по фоторезисту и различным полимерным покрытиям, а канал, работающий на длине волны 532 нм, позволяет работать со стеклянными подложками, покрытыми тонкими пленками металлов, для использования термохимической технологии прямой лазерной записи амплитудных дифракционных элементов и масок [11–12]. Важно также, что запись на длине волны 266 нм потенциально позволяет сократить размер сфокусированного пятна (приблизительно вдвое, с размером пятна при записи в режиме иммерсии менее 100 нм) [13]. Внешний вид круговой записывающей системы приведен на рис. 1, б.

Значительная часть функциональных возможностей и технических параметров лазерных нанолитографических систем определена возможностями программно-аппаратного комплекса (ПАК). Поскольку работа над созданием описанных установок велась на протяжении длительного времени, в их основу изначально были положены ПАК различных поколений, реализованные на программно-аппаратной базе, не совместимой ни между собой, ни с современными стандартными, промышленными решениями. Поэтому крайне остро стоит задача модернизации ПАК,

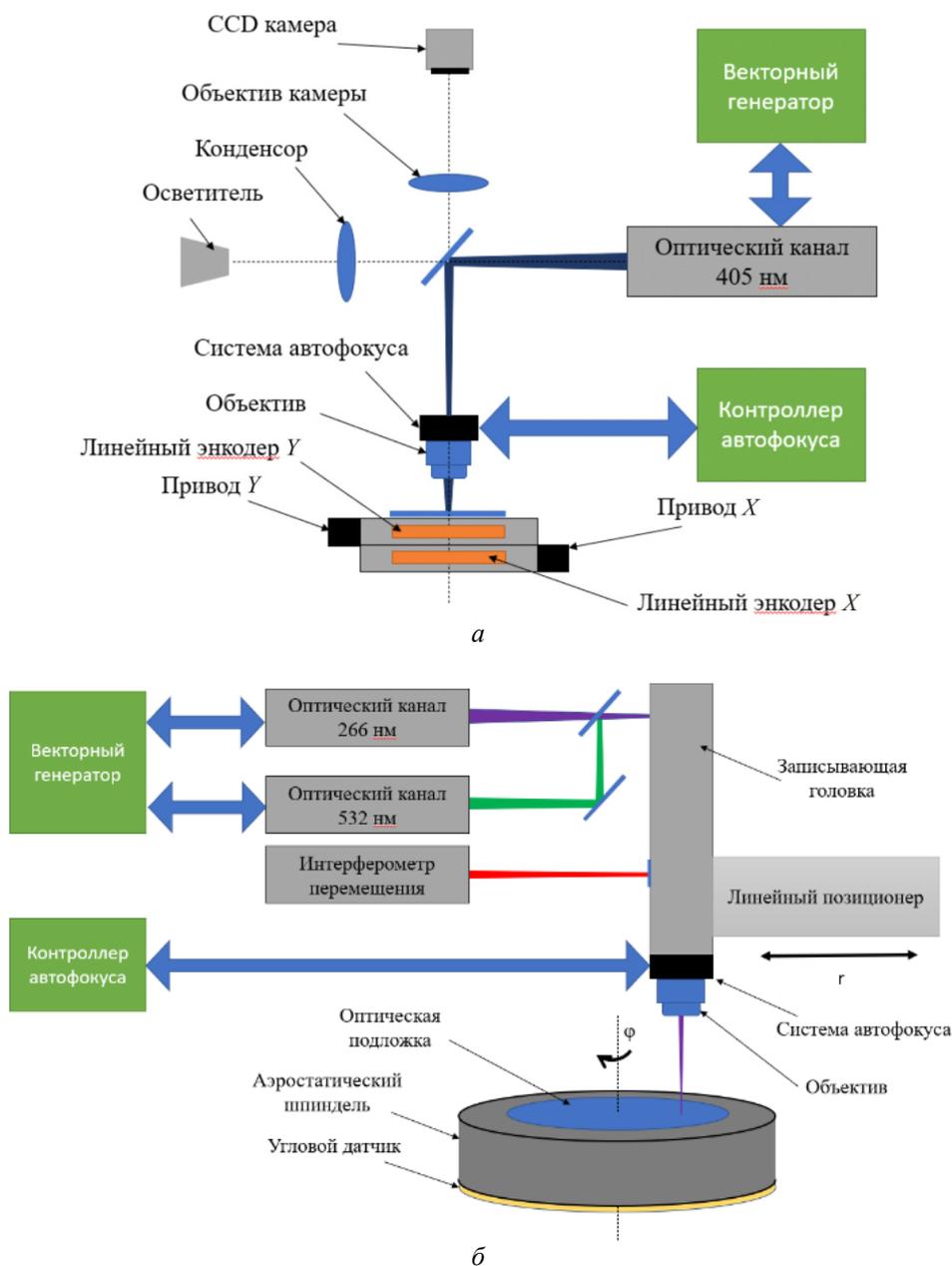


Рис. 1. Структурные схемы лазерных нанолитографов, работающих в прямоугольной (а) и полярной (б) системах координат

которая могла бы позволить унифицировать программно-аппаратную и элементную базу разработанных лазерных нанолитографических систем, работающих как в прямоугольной системе координат, так и в кру-

говой, сделать его гибким и совместимым с современными промышленными решениями, стандартами и форматами и, кроме того, за счет использования современной быстродействующей элементной базы улучшить ключевые параметры лазерных нанолитографов, таких как точность и скорость записи (рис. 2).

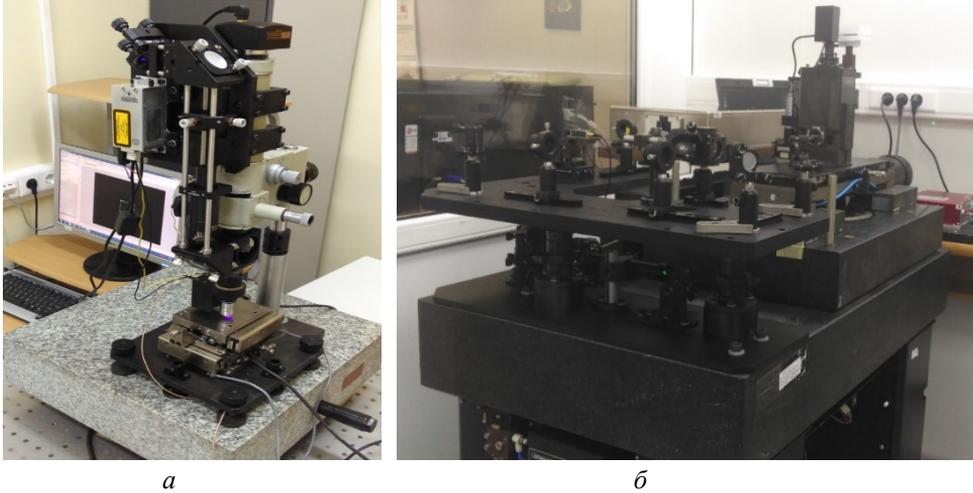


Рис. 2. Внешний вид X - Y (*a*) и круговой (*б*) систем

Наиболее целесообразно реализовывать унифицированный ПАК на архитектуре «система на кристалле» SoC, построенный по принципу ПЛИС + набор вычислительных ядер [14]. Современные решения, построенные по этому принципу, обладают очень продолжительным временем поддержки, и, как правило, производители обеспечивают их преемственностью и обратной совместимостью. Поэтому использование данного подхода к ПАК позволит в долгосрочной перспективе развивать систему без необходимости кардинального обновления аппаратной среды.

Данный подход к физической реализации ПАК существенно упрощает интеграцию новых устройств в готовую систему, что позволяет с его применением легко распространять функциональные возможности на различные типы литографических систем, а также производить их плановую модернизацию.

Значительным преимуществом данного подхода также является возможность интеграции программного обеспечения (ПО) в вычислительную систему ПАК. Реализация физического и логического уровня

ПАК на едином кристалле позволяет существенно снизить задержки при передаче данных между взаимодействующими между собой программными и аппаратными модулями, использовать жесткую внутреннюю синхронизацию, существенно упростить электронную схему, за счет чего значительно повысить общую отказоустойчивость литографических систем.

На данном этапе в лаборатории дифракционной оптики ИАиЭ СО РАН ведутся работы по развитию ПАК лазерных нанолитографических систем. В качестве базы для создания ПАК выбран SoC Xilinx Zynq® семейства Ultrascale+ [15] как наиболее производительный из доступных на данный момент. На его основе под управлением операционной системы семейства GNU/LINUX было разработано программное ядро концепции интерфейсов устройства (КИУ), которое позволяет объединить в одну логическую связь неограниченное количество логических модулей и предоставляет широкие возможности для их взаимодействия разработчику. Часть функциональных возможностей лазерных литографических систем, такие как система автофокуса и служба менеджмента электропитания, были успешно интегрированы в ПАК и настроены для работы с КИУ. В дальнейшем планируется проводить дальнейшие работы по развитию ПАК, для этого в ближайшее время в КИУ будут интегрированы модули векторного генератора и контроллера координатной системы. Завершение работ над унифицированным ПАК лазерных нанолитографических систем существенно улучшит характеристики записываемых микро- и наноизображений.

Для повышения разрешающей способности записи планируется провести доводку оптических каналов острой фокусировки лазерных пучков в части более прецизионной настройки узлов оптических трактов, с устранением остаточных aberrаций оптических узлов, пространственной фильтрацией пучков технологических лазеров, применением радиальной формы поляризации лазерных пучков и подбором оптимальной формы кольцевой аподизации пучков (по результатам тестовых записей).

Результаты записи тестов микро- и наноструктур

Для проверки работоспособности нанолитографов были проведены тестовые записи регулярных одномерных дифракционных решеток на пленках титана с различной мощностью записывающего пучка и

скоростью сканирования. На рис. 3, *а* приведены микрофотографии тестовых решеток, записанных на X–Y нанолитографе при различных мощностях лазерного пучка с периодом между треками 1 мкм. Для круговой записывающей системы была проведена запись тестовых решеток в непрерывном (рис. 3, *б*) и импульсном (рис. 3, *в*) режимах. Период структур был 1 мкм, толщина пленки титана – 79 нм, диаметр сфокусированного лазерного пучка – 0,7 мкм (на данном этапе размер был ограничен остаточными абберациями оптического тракта). Мощность лазерного пучка в непрерывном режиме составляла 33,9 мВт, скорость сканирования $V = 135,7$ мм/с. В импульсном режиме мощность пучка была 34,4 мВт, скорость сканирования $V = 156,8$ мм/с.

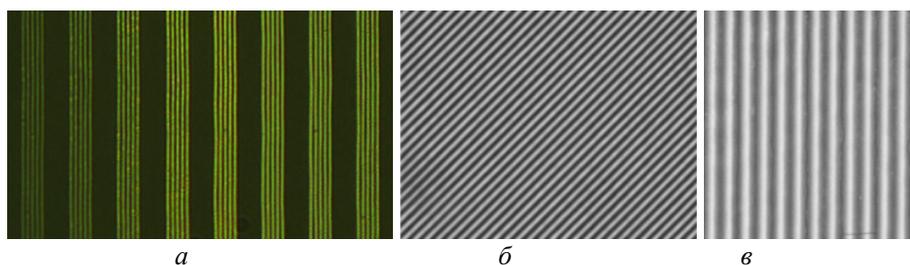


Рис. 3. Микроизображения тестовых решеток, записанных на X–Y системе (*а*), СЭМ изображения решеток, записанных на круговой системе в непрерывном (*б*) и импульсном (*в*) режимах

Трещины, наблюдаемые на сформированных решетках в режиме импульсной записи, могут быть следствием влияния стеклянной подложки на металлическую пленку в процессе записи. При импульсном режиме тепловое воздействие краткосрочное и не происходит накопления и поддержания напряжений в пленке, как при непрерывном воздействии лазерного пучка. Поэтому импульсный режим облучения лучше подходит для пленок титана. Благодаря ему деформация пленки происходит лишь в локальной области непосредственно вблизи записывающего пучка. Тем не менее даже такие напряжения приводят к образованию трещин вдоль записанных треков. В круговых записывающих системах использование импульсного режима затруднительно во всем диапазоне скоростей сканирования, поэтому, вероятно, надо комбинировать эти два метода экспонирования. Вблизи центра вращения подложки можно использовать импульсный режим, а при удалении от него включать непрерывный режим, который при скоростях сканирования несколько метров в секунду уже фактически эквивалентен импульсному режиму.

Заключение

Таким образом, в работе представлены описание и принципы работы литографических систем, разработанных в ИАиЭ СО РАН. Первый компактный и относительно простой нанолитограф с модульным принципом построения работает в прямоугольной системе координат и осуществляет лазерную запись произвольных планарных структур на пленках металлов, на поле размером 50×50 мм, с дискретностью измерения координат ± 1 нм и с предельным пространственным разрешением порядка 350–450 нм (к настоящему времени). Второй, более сложный и крупногабаритный нанолитограф с жесткой неперестраиваемой структурой, работает в полярной системе координат и осуществляет лазерную запись произвольных планарных структур так же на пленках металлов, на поле диаметром до 185 мм, с дискретностью позиционирования лазерного луча ± 1 нм и с пространственным разрешением порядка 380–500 нм (к настоящему времени). Оба нанолитографа прошли первые тестовые испытания, которые подтвердили возможность изготовления микро- и наноструктур. Приведено описание унифицированного ПАК, предназначенного для управления нанолитографическими системами. Описаны предложенные технические решения и перспективы их развития.

Работа выполнена при поддержке гранта Министерства образования и науки РФ АААА-А17-117052210002-7 и при использовании оборудования ЦКП «Спектроскопия и оптика».

Список литературы

- 1 Козлова Е.С., Котляр В.В. Исследование зависимости величины обратного потока энергии от параметров рельефа амплитудных зонных пластинок // Прикладная фотоника. – 2019. – Т 6, № 3–4. – С. 160–170.
2. Разработка сканирующего лазерного нанолитографа для исследований по сверхразрешающей записи дифракционных наноструктур / А.Г. Полещук, А.Е. Качкин, В.П. Корольков, Р.В. Шиманский, В.Н. Хомутов, А.Г. Седухин // СибОптика-2018: Интерэкспо ГЕО-Сибирь: материалы XIV Междунар. науч. конгр.: сб. материалов: в 2 т. (Новосибирск, 23–27 апреля 2018 г.). – Новосибирск: Изд-во СГУГиТ, 2018. – Т. 2. – С. 3–8.
3. Киноформы: технология, новые компоненты и оптические системы. Ч. I / В.П. Коронкевич, В.П. Корольков, Г.А. Ленкова, И.А. Ми-

хальцова, И.Г. Пальчикова, А.Г. Полещук, А.Г. Седухин, Е.Г. Чурин, Ю.И. Юрлов // Автометрия. – 1989. – № 3.

4. Fabrication of diffractive optical elements by laser writing with circular scanning / V.P. Koronkevich, V.P. Kiryanov, V.P. Korol'kov, A.G. Poleshchuk, V.A. Cherkashin, A.A. Kharissov // Technical Digest (Optical Society of America, Washington, D.C.). – 1994. – Vol. 9. – P. 310–313.

5. 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. Korol'kov, A.A. Kharissov, V.V. Cherkashin, V.P. Kiryanov, A.V. Kiryanov, S.A. Kokarev, A.G. Verhoglyad // Applied Optics. – 1999. – Vol. 38, № 8. – P. 1295–1301.

6. Двухканальная круговая лазерная записывающая система для изготовления дифракционных и микрооптических элементов / А.Г. Верхогляд, В.П. Корольков, С.А. Кокарев, Л.Б. Касторский, А.Г. Полещук // ГолоЭкспо-2013: сб. тр. 10-й Междунар. конф. (17–18 сентября 2013, г. Москва). – М., 2013. – С. 182–187.

7. Круговая лазерная записывающая система для формирования фазовых и амплитудных микроструктур на сферических поверхностях / А.Г. Верхогляд, М.А. Завьялова, С.А. Кокарев, В.П. Корольков, А.Е. Качкин // Датчики и системы. – 2015. – № 10. – С. 45–52.

8. Bowen J.P., Michaels R.L., Blough C.G. Generation of large-diameter diffractive elements with laser pattern generation // Appl. Opt. – 1997. – № 36(34). – С. 8970–8975.

9. Xie Y., Lu Z., Li F. Lithographic fabrication of large curved hologram by laser writer // Opt. Express. – 2004. – 12. – P. 1810–1814.

10. Diffractive optics fabrication system for large aspheric surface testing / H.-G. Rhee, J.-B. Song, D.-I. Kim, Y.-W. Lee // J. Korean Phys. Soc. 50. – 2007. – P. 1032–1036.

11. Processing parameters optimization for thermochemical writing of DOEs on chromium films / V.V. Cherkashin, E.G. Churin, V.P. Korol'kov, V.P. Koronkevich, A.A. Kharissov, A.G. Poleshchuk, J.H. Burge // Proc. SPIE. – 1997. – Vol. 3010. – P. 168–179.

12. Исследование пространственного разрешения лазерной термохимической технологии записи дифракционных микроструктур / В.П. Вейко, В.И. Корольков, А.Г. Полещук, А.Р. Саметов, Е.А. Шахно, М.В. Ярчук // Квантовая электроника. – 2011. – 41, 7. – С. 631–636

13. Sedukhin A.G., Poleshchuk A.G. Efficient tight focusing of laser beams optimally matched to their thin-film linear-to-radial polarization con-

version: Method, implementation, and field near focus // *Optics Communications*. – 2018. – Vol. 407. – P. 217–226.

14. Shaaban M. *Basics of Computer Design: Lecture // CMPE-550*. – Rochester, NY. – August 29, 2017.

15. Hansen L. *Unleash the Unparalleled Power and Flexibility of Zynq UltraScale+ MPSoCs, Zynq UltraScale+ MPSoC*. – Xilinx, 2016. – June 15.

References

1. Kozlova E.S., Kotliar V.V. Issledovanie zavisimosti velichiny obratnogo potoka energii ot parametrov rel'efa amplitudnykh zonnykh plastinok [Study of the dependence of the magnitude of the reverse energy flux on the parameters of the relief of amplitude zone plates]. *Prikladnaia fotonika*, 2019, vol. 6, no. 3-4, pp. 160-170.

2. Poleshchuk A.G., Kachkin A.E., Korol'kov V.P., Shimanskii R.V., Khomutov V.N., Sedukhin A.G. Razrabotka skaniruiushchego lazernogo nanolitografa dlia issledovaniia po sverkhrazreshaiushchei zapisi difraktsionnykh nanostruktur [Development of a scanning laser nanolithograph for research on super-resolution recording of diffractive nanostructures]. “*SibOptika-2018*”: *Interespo GEO-Sibir'. Materialy XIV Mezhdunarodnogo nauchnogo kongressa* (Novosibirsk, 23-27 April 2018). Novosibirsk: Sibirskii gosudarstvennyi universitet geosistem i tekhnologii, 2018, vol. 2, pp. 3-8.

3. Koronkevich V.P., Korol'kov V.P., Lenkova G.A., Mikhail'tsova I.A., Pal'chikova I.G., Poleshchuk A.G., Sedukhin A.G., Churin E.G., Iurlov Iu.I. Kinoformy: tekhnologiia, novye komponenty i opticheskie sistemy. Chast' I [Kinoforms: technology, new components and optical systems. Part I]. *Avtometriia*, 1989, no. 3.

4. Koronkevich V.P., Kiryanov V.P., Korol'kov V.P., Poleshchuk A.G., Cherkashin V.A., Kharissov A.A. Fabrication of diffractive optical elements by laser writing with circular scanning. *Technical Digest (Optical Society of America, Washington, D.C)*, 1994, vol. 9, pp. 310-313.

5. Poleshchuk A.G., Churin E.G., Koronkevich V.P., Korol'kov V.P., Kharissov A.A., Cherkashin V.V., Kiryanov V.P., Kiryanov A.V., Kokarev S.A., Verhoglyad A.G. Polar coordinate laser pattern generator for fabrication of diffractive optical elements with arbitrary structure. *Applied Optics*, 1999, vol. 38, no. 8, pp. 1295-1301.

6. Verkhogliad A.G., Korol'kov V.P., Kokarev S.A., Kastorskii L.B., Poleshchuk A.G. Dvukhkanal'naia krugovaia lazernaia zapisyvaiushchaia

sistema dlia izgotovleniia difraktsionnykh i mikroopticheskikh elementov [Two-channel circular laser recording system for the manufacture of diffractive and micro-optical elements]. "GoloEkspo-2013". *Sbornik trudov 10-i Mezhdunarodnoi konferentsii* (17-18 September 2013, Moscow). Moscow, 2013, pp. 182-187.

7. Verkhogliad A.G., Zav'ialova M.A., Kokarev S.A., Korol'kov V.P., Kachkin A.E. Krugovaia lazernaia zapisyvaiushchaia sistema dlia formirovaniia fazovykh i amplitudnykh mikrostruktur na sfericheskikh poverkhnostiakh [Circular laser recording system for the formation of phase and amplitude microstructures on spherical surfaces]. *Datchiki i sistemy*, 2015, no. 10, pp. 45-52.

8. Bowen J.P., Michaels R.L., Blough C.G. Generation of large-diameter diffractive elements with laser pattern generation. *Appl. Opt.*, 1997, no. 36(34), pp. 8970-8975.

9. Xie Y., Lu Z., Li F. Lithographic fabrication of large curved hologram by laser writer. *Opt. Express* 12, 2004, pp. 1810-1814.

10. Rhee H.-G., Song J.-B., Kim D.-I., Lee Y.-W. Diffractive optics fabrication system for large aspheric surface testing. *J. Korean Phys. Soc.* 50, 2007, pp. 1032-1036.

11. Cherkashin V.V., Churin E.G., Korol'kov V.P., Koronkevich V.P., Kharissov A.A., Poleshchuk A.G., Burge J.H. Processing parameters optimization for thermochemical writing of DOEs on chromium films. *Proc. SPIE*, 1997, vol. 3010, pp. 168-179.

12. Veiko V.P., Korol'kov V.I., Poleshchuk A.G., Sametov A.R., Shakhno E.A., Iarchuk M.V. Issledovanie prostranstvennogo razresheniia lazernoï termokhimicheskoi tekhnologii zapisi difraktsionnykh mikrostruktur [Investigation of the spatial resolution of laser thermochemical technology for recording diffractive microstructures]. *Kvantovaia elektronika*, 2011, vol. 41, no. 7, pp. 631-636.

13. Sedukhin A.G., Poleshchuk A.G. Efficient tight focusing of laser beams optimally matched to their thin-film linear-to-radial polarization conversion: Method, implementation, and field near focus. *Optics Communications*, 2018, vol. 407, pp. 217-226.

14. Shaaban M. Basics of Computer Design: Lecture. CMPE-550. Rochester, NY, August 29, 2017.

15. Hansen L. Unleash the Unparalleled Power and Flexibility of Zynq UltraScale+ MPSoCs, Zynq UltraScale+ MPSoC. Xilinx, 2016. June 15.