

## **ОПТИМИЗАЦИЯ ОПТИЧЕСКОГО КАНАЛА X-Y ЛАЗЕРНОГО НАНОЛИТОГРАФА ДЛЯ ЗАПИСИ НА ФОТО- И ТЕРМОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛАХ**

### ***Виктор Павлович Корольков***

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, доктор технических наук, зав. лабораторией дифракционной оптики, тел. (383)333-30-91, e-mail: victork@iae.nsk.ru

### ***Андрей Георгиевич Седухин***

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, тел. (383)333-30-91, e-mail: sedukhin@iae.nsk.ru

### ***Антон Евгеньевич Качкин***

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, инженер-программист, тел. (383)333-30-91, e-mail: anton.kachkin@yandex.ru

### ***Андрей Евгеньевич Елисафенко***

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, техник-программист; Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, тел. (383)333-30-91, e-mail: andchernobl@gmail.com

Описываются новые узлы и модифицированные конструктивные элементы оптического канала сканирующего X-Y лазерного нанолитографа для прямой лазерной записи субволновых дифракционных структур на тонкопленочных фото- и термочувствительных материалах, наносимых на планарные прозрачные стеклянные подложки. Существенные изменения были введены в узел пространственно-частотной фильтрации, расширения и коллимации лазерного пучка записывающего лазера. Новым узлом для оперативной in-situ регистрации записанной дифракционной структуры является узел обратной некогерентной подсветки.

**Ключевые слова:** сканирующий лазерный нанолитограф, субволновые дифракционные наноструктуры, тонкие металлические пленки, фоторезист, коллимированный пучок, некогерентная подсветка.

## **OPTIMIZATION OF OPTICAL CHANNEL OF SCANNING LASER NANOLITHOGRAPHER FOR WRITING ON PHOTO- AND THERMO-SENSITIVE MATERIALS**

### ***Victor P. Korolkov***

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 1, Prospect Akademik Koptyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Head of Laboratory of Diffraction Optics, phone: (383)333-30-91, e-mail: victork@iae.nsk.ru

### ***Andrey G. Sedukhin***

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 1, Prospect Akademik Koptyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Leading Researcher, phone: (383)333-30-91, e-mail: sedukhin@iae.nsk.ru

***Anton E. Kachkin***

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 1, Prospect Akademik Koptyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Engineer-Programmer, phone: (383)333-30-91, e-mail: anton.kachkin@yandex.ru

***Andrey E. Elisafenko***

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 1, Prospect Akademik Koptyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Technician-Programmer; Novosibirsk National Research State University, 2, Pirogova St., Novosibirsk, 630073, Russia, phone: (383)333-30-91, e-mail: andchernobl@gmail.com

New units and modified constructional components of an optical channel of a scanning X-Y laser nanolithographer are described. The nanolithographer serves for direct laser writing of subwavelength diffractive structures on thin-film photo- and thermo-sensitive materials deposited on planar transparent glass substrates. Significant changes were introduced into a unit of spatial frequency filtration, expansion and collimation of the laser beam of a writing laser. A new unit for on-line in-situ inspection of written diffractive structure is a unit of backward incoherent illumination.

**Key words:** scanning laser nanolithographer, subwavelength diffractive nanostructures, thin metal films, photoresist, collimated beam, incoherent illumination.

Для проведения исследований по сверхразрешающей прямой лазерной записи структуры дифракционных элементов с субволновой структурой, за последнее время, в ИАиЭ СО РАН был разработан пилотный вариант прецизионного сканирующего X-Y лазерного нанолитографа (ЛНЛ) [1], ориентированного на структуры с общим полем порядка  $2 \times 2 \text{ мм}^2$  и на запись этих структур непрерывным лазерным пучком с длиной волны 405 нм. В процессе первых экспериментов по записи тестовых дифракционных структур и контролю их геометрических и физических параметров, было установлено, что точностные и эксплуатационные характеристики ряда узлов ЛНЛ не в полной мере соответствуют ожидаемым и расчетным данным. В особенности это касается такого важного узла, как оптический канал записи и in-situ контроля записываемых структур. Кроме того, с целью расширения допустимого диапазона размерных параметров сменных серийных и специально спроектированных объективов записи (включая геометрические размеры, размеры рабочих апертур и рабочие отрезки), было принято решение о необходимости существенного расширения (более, чем в два раза) максимального поперечного размера коллимированного записывающего пучка (до 15 мм), а также сохранения возможности получения малого размера пучка (порядка 6 мм). Такая необходимость была обусловлена стремлением реализации большого рабочего отрезка объектива записи (до 1–1,5 мм), необходимого для проведения записи через стеклянные кварцевые подложки порядка 1 мм. Возможность получения большого рабочего отрезка основана на характеристиках нескольких вариантов разрабатываемого экспериментального объектива с относительно большой линейной апертурой [2–4]. Необходимость сохранения малых поперечных размеров коллимированного пучка записи вызвана стремлением более полного сохранения энергии и ресурса работы записывающего лазера при альтернативном экспериментальном изу-

чении характеристик ряда потенциальных вариантов серийных высокоапертурных объективов с малыми размерами рабочих отрезков (порядка 0,15–0,25 мм) и малыми линейными размерами входных апертур. Для повышения же степени плоскостности формируемого волнового фронта коллимированного лазерного пучка, потребовалась также установка фильтрующих ирисовых диафрагм меньшего размера (до 10 мкм).

Рабочий эскиз трехмерной модели разработанного ЛНЛ с модифицированным оптическим каналом приведен на рис. 1. Характеристики большей части узлов и отдельных компонентов ЛНЛ ранее были детально описаны в предшествующей работе [1] и поэтому здесь не приводятся. Основное внимание уделяется рассмотрению новых узлов и модифицированных компонентов оптического канала.

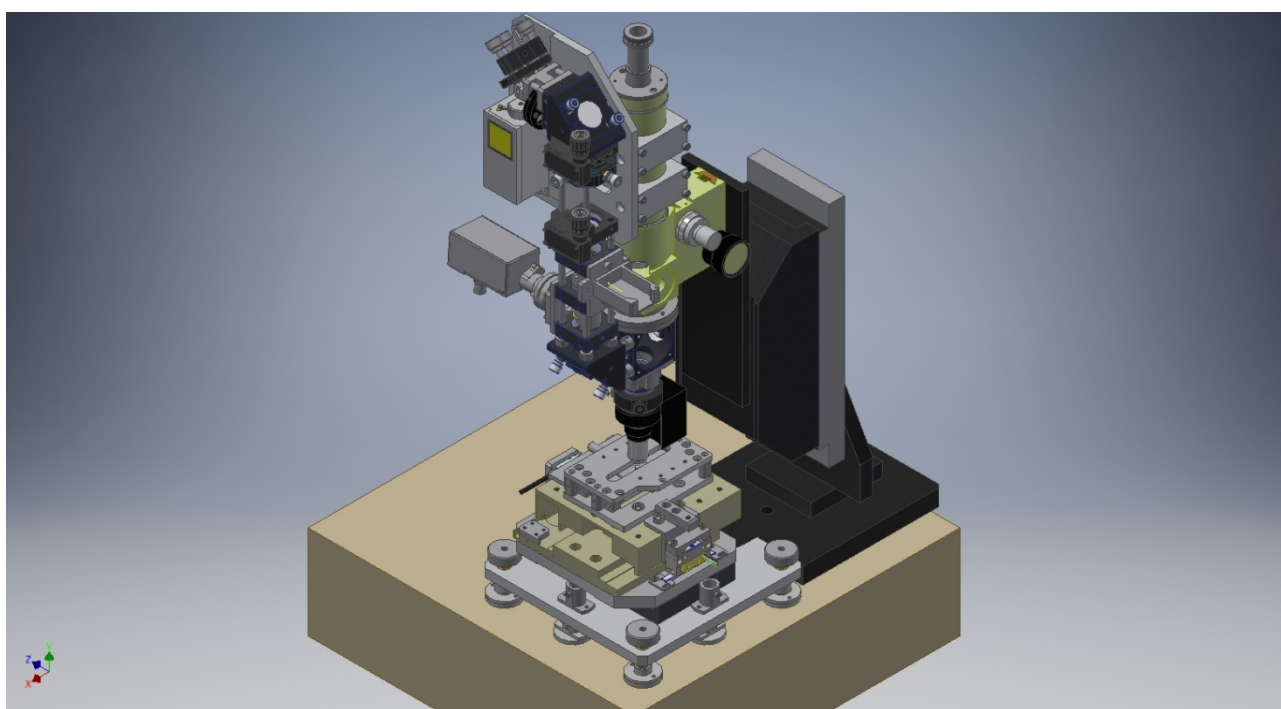


Рис. 1. Эскиз ЛНЛ

Упрощенная оптическая схема оптического канала представлена в развернутом виде на рис. 2, с исключением отображения ряда поворотных зеркал и соответствующих изломов хода светового пучка. Сопряженные узлы механического перемещения отдельных компонентов схемы и измерения их положения также не показаны. Монтровка данной схемы имеет, в основном, вертикальное исполнение и проведена на базе штатива измерительного микроскопа с новым основанием из гранитной плиты. Большинство компонентов имеет возможность перемещаться, в определенных пределах, на специальных направляющих и возможность замены (в случае необходимости при настройке схемы) на другие аналогичные компоненты. Узел лазерного облучения содержит по-

следовательно расположенные полупроводниковый лазер 1 с линейной поляризацией и длиной волны 405 нм, нейтральный ослабитель света 2, полуволновую пластинку 3, конвертер поляризации из линейной в радиальную либо азимутальную 4, асферическую линзу 5, точечную диафрагму 6, коллимирующую линзу 7 (имеющую фокусное расстояние кратно большее чем линза 5 для расширения пучка), поворотное глухое зеркало 8, поворотное полупрозрачное зеркало 9, специально рассчитываемый аподизирующий фильтр 10, заградительную центральную диафрагму 11 для более эффективной организации кольцевого освещения и, наконец, высокоапертурный апланатический либо специально разработанный дифракционно-рефракционный объектив 12. Узел освещения служит для генерации в фокальной плоскости объектива 12 сверхмалого по размерам лазерного пятна необходимого для облучения располагаемого также в фокальной плоскости регистрирующего фото либо термочувствительного материала в виде тонкой пленки на поверхности планарной стеклянной подложки 13.

Лазерный пучок может модулироваться по мощности, как в аналоговом, так и в импульсном режиме изменением тока лазера 1. Подложка 13 монтируется на толстой планарной пластине 14 с однородным светорассеиванием по объему. В свою очередь, пластина 14 устанавливается на подвижном столике (на схеме не показанном) с компьютерно-контролируемым прецизионным перемещением по координатам X, Y.

Синтез дифракционной структуры на материале регистрирующего материала проводится путем растрового построчного сканирования поверхности подложки при изменении положения столика и модуляции лазерного пучка в соответствии с характером рисунка структуры. При использовании в качестве регистрирующего материала металлических пленок и порогового термохимического режима записи и выявления записанной структуры, анализ качества небольших локальных участков амплитудного рисунка записанной структуры возможно осуществить непосредственно на столике ЛНЛ, путем локального жидкостного травления пленок. Для оперативного in-situ контроля изображения записанной структуры в оптическом канале дополнительно предусмотрен узел регистрации, в который входит последовательно расположенные некогерент-

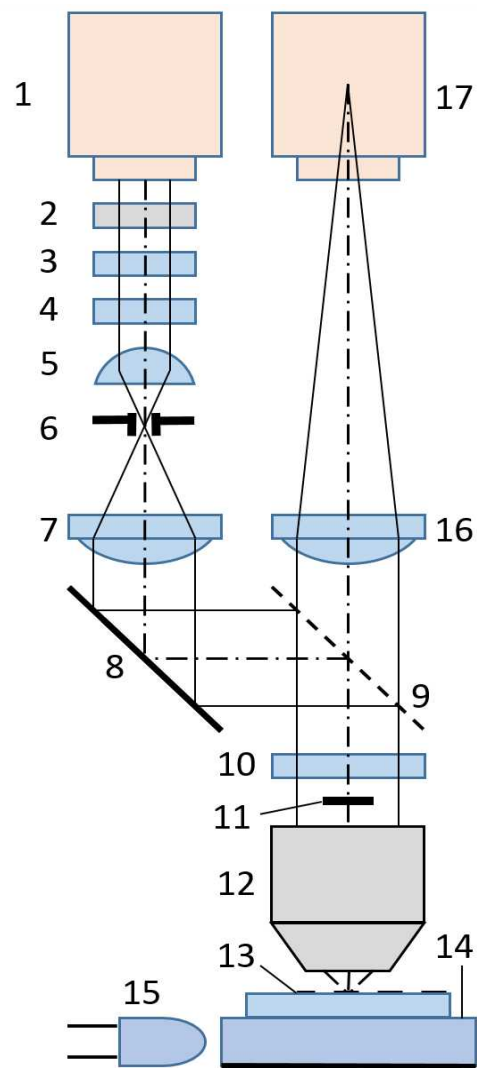


Рис. 2. Схема оптического канала ЛНЛ

ный источник света в виде набора мощных светодиодов 15 (на схеме условно показан только один светодиод) с длиной волны 405 нм для подсветки пластины 14, сама пластина 14, подложка 13, объектив 12, заградительная диафрагма 11, фильтр 10, светоделитель 9, тубусная линза 16 и видеокамера 17. Некогерентное изображение, регистрируемое на фотоматрице видеокамеры позволяет провести оперативный анализ записанной структуры, не снимая подложку со столика ЛНЛ.

Используя специальный компьютерно-синтезированный фильтр 10, в зоне записи можно реализовать пучок с формой близкой к гауссовой (при сверхмалом дифракционно-ограниченном и круглом поперечном размере пучка) и использовать непороговые фоточувствительные материалы, взамен термочувствительных.

Кроме того, при указанном использовании одной и той же длины волны 405 нм для когерентного пучка записывающего лазера и для некогерентной подсветки записываемой структуры, реализуется возможность формирования на камере неискаженного хроматическими аберрациями суммарного изображения, которое объединяет изображение функции рассеяния точки объектива (при малой мощности лазерного пучка, на фоне отражающих элементов структуры) и самой записанной структуры. Использование данного режима регистрации позволяет также определить поперечный размер сфокусированного лазерного пятна по отношению к заранее известному размеру элементов синтезируемой структуры.

Представленная схема оптического канала ЛНЛ обладает, помимо высоких точностных показателей, обладает гибкими функциональными возможностями. В частности, используя сменные оптические компоненты с различными рабочими характеристиками (линзы, высокоапертурные объективы, фильтры и т. п.), данная схема позволяет осуществлять перестройку рабочих режимов острой фокусировки лазерного пучка, а также регистрацию локальных участков изображения. В процессе проведения экспериментов, элементы 10, 11 могут быть переставлены на участок между элементами 8, 9.

Таким образом, в данной работе была разработана и исследована новая схема оптического канала ЛНЛ, обладающая улучшенными эксплуатационными характеристиками и расширенными функциональными возможностями по контролю записываемых дифракционных структур.

*Данная работа выполнена при финансовой поддержке РФФ, проект № 17-19-01721.*

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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 // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XIV Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2018» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 23–27 апреля 2018 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2018. Т. 2. – С. 3–8.

2. Седухин А. Г., Полещук А. Г. Зеркально-дифракционный объектив для фокусировки лазерного радиально поляризованного пучка в пятно предельно малого размера // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2016» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 18–22 апреля 2016 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. Т. 2. – С. 42–46.

3. Седухин А. Г., Полещук А. Г. Особенности юстировки высокоапертурного дифракционно-рефлекторного объектива // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2017» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 17–21 апреля 2017 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2017. Т. 1. – С. 91–95.

4. 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. – V. 407. – P. 217–226.

© В. П. Корольков, А. Г. Седухин, А. Е. Качкин, А. Е. Елисафенко, 2019