



DOI: 10.22184/FRos.2019.13.5.468.475

# Технологии формообразования светосильных дифракционных оптических элементов на основе использования делительной техники маятникового типа

А. Н. Мельников, *gipo@telebit.ru* АО «НПО «Государственный институт прикладной оптики», Казань, Россия

Рассмотрены особенности и ограничения технологий формообразования и перспективные области использования светосильных дифракционных оптических элементов. Для целого ряда приложений необходимо изготавливать нарезные светосильные дифракционные оптические элементы на сферических и асферических поверхностях с большой стрелкой прогиба, что на практике недостижимо с применением имеющегося технологического оборудования. Предлагаются технические решения, открывающие возможность расширить номенклатуру светосильных дифракционных оптических элементов, на основе использования делительной техники маятникового типа с последующим реплицированием дифракционной структуры в полимерном слое.

**Ключевые слова:** светосильные дифракционные оптические элементы, светосильные нарезные дифракционные решетки, технологии формообразования, области применения, светосильный компактный спектрограф, делительная машина маятникового типа, мастер-матрица, реплицирование, фотополимеры.

Статья получена: 28.05.2019. Принята к публикации: 16.07.2019.

## High-aperture diffraction optical element shaping techniques based on the use of pendulum-type ruling engines

А. Н. Мельников, *gipo@telebit.ru* JSC «NPO «State Institute of Applied Optics», Kazan, Russia

This paper touches upon the features and limitations of shaping techniques and promising application ranges of high-aperture diffraction optical elements. A number of applications require manufacturing ruled high-aperture diffraction optical elements on spherical and aspherical surfaces with a large sag, which is unachievable in practice with the existing manufacturing equipment. Engineering solutions have been suggested that open up the possibility to broaden the range of high-aperture diffraction optical elements basing on the use of pendulum-type ruling engines with subsequent replication of diffraction structure in the polymer layer.

**Key words:** high-aperture diffraction optical elements, high-aperture ruled gratings, shaping techniques, ranges of application, high-aperture compact spectrograph, pendulum-type ruling engine, master matrix, replication, photopolymers.

Received: 28.05.2019. Accepted: 16.07.2019.

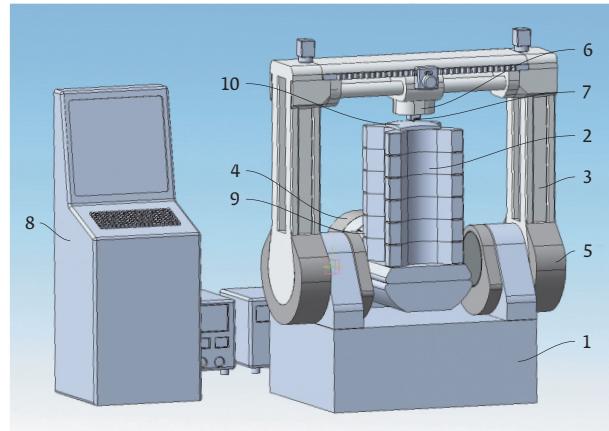
При создании компактных и светосильных аналитических спектральных приборов для решения ряда задач фундаментального, поискового и прикладного характера (фундаментальные исследования, контроль излучения плазмы, дистанционное зондирование Земли из космоса, экологический мониторинг, контроль химического состава веществ и др.) необходимо использовать отражательные и пропускающие светосильные дифракционные оптические элементы (ДОЭ) с высокой дифракционной эффективностью на выпуклых и вогнутых сферических и асферических поверхностях с большой стрелкой прогиба (большой крутизной) рабочей поверхности [1-4]. Такие ДОЭ обладают как диспергирующими свойствами, так и оптической силой, что позволяет минимизировать массогабаритные характеристики спектральных приборов, а также улучшить их энергетические и aberrационные характеристики.

В настоящее время ДОЭ подобного типа изготавливаются на основе применения следующих технологий [5-20]:

- нарезная технология, реализуемая с использованием делительных машин и высокоточных токарных станков с числовым программным управлением;
- голограммические технологии;
- фотолитографические технологии;
- 3D-технологии полимеризации в фотополимерных материалах.

В качестве иллюстрации в таблице 1 приведены параметры неплоских нарезных и голограммных дифракционных решеток стандартного ряда, предлагаемых в настоящее время в каталогах некоторых фирм; из таблицы 1 видно, что наибольшее значение стрелки прогиба рабочей поверхности для нарезных дифракционных решеток составляет 4,02 мм, для голограммных – 8,02 мм. При этом, как известно, классические нарезные технологии обеспечивают достижение наибольших значений дифракционной эффективности, но уступают голограммным технологиям по светосиле.

Фотолитографические технологии на базе применения аппаратуры прямой лазерной записи обеспечивают формообразование структуры ДОЭ на неплоских поверхностях со стрелками прогиба не более 5,2 мм [9, 20]. Имеющиеся технологические ограничения определяются характером зависимости размера пятна рассеяния записывающей лазерной системы от изменения угла между нормалью к рабочей поверхности ДОЭ и оптической



**Рисунок.** Основные узлы и элементы делительной машины маятникового типа: 1 – станина; 2 – делительная каретка; 3 – резцовая каретка; 4 – привод делительной каретки; 5 – привод резцовой каретки; 6 – механизм подъема и опускания алмазного резца; 7 – алмазный резец; 8 – блок управления приводами делительной и резцовой кареток и механизмом подъема и опускания алмазного резца; 9 – датчик углового положения делительной каретки; 10 – подложка изготавливаемой нарезной дифракционной решетки

осью формирующего объектива, чувствительностью и контрастом используемого фотоматериала, что в результате вызывает неравномерность дифракционной эффективности в пределах светового диаметра ДОЭ.

3D-технологии полимеризации в фотополимерных материалах позволяют получать трехмерные дифракционные структуры на ограниченном световом диаметре – в пределах нескольких миллиметров [10, 15].

Таким образом, в настоящее время наиболее перспективным направлением, обеспечивающим возможность создания светосильных ДОЭ с высокой дифракционной эффективностью, является реализация нарезных технологий с необходимостью разработки принципиально нового технологического оборудования.

В работе [21] рассмотрен пример расчета и оптимизации оптической схемы компактного светосильного спектрографа, построенного на основе использования вогнутой отражательной неклассической нарезной дифракционной решетки.

Оптимизированные параметры оптической схемы спектрографа следующие:

- пространственная частота штрихов решетки в вершине  $712 \text{ mm}^{-1}$ ;



## ТЕХНОЛОГИИ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

**Таблица.** Современный уровень развития технологий формообразования коммерчески доступных неплоских нарезных и голограммных дифракционных решеток

№ п/п	Параметр ДОЭ	1. Классические нарезные технологии				
		Аберрационно-корректированные вогнутые решетки для высоко-разрешающего монохроматора Seya-Namioka [5]	Аберрационно-корректированные вогнутые решетки для компактного высокоеффективного монохроматора [5]	Аберрационно-корректированные вогнутые решетки для спектрографов с плоским полем [5]	Выпуклые решетки [6]	Вогнутые решетки для спектрографов на круге Рулянда [17]
1.1	Диапазон размеров рабочей поверхности, мм	от 21×16 до 76×72	от 16×16 до 96×56	от 5×5 до 46×46	24×22	от 20×20 до 130×120
1.2	Диапазон радиусов кривизны рабочей поверхности, мм	от 200 до 1000	от 80 до 3000	от 50 до 500	от 35 до 80	от 115 до 10685
1.3	Диапазон стрелок прогиба рабочей поверхности, мм	от 0,16 до 0,72	от 0,13 до 0,91	от 0,06 до 0,53	от 1,67 до 4,02	от 0,10 до 1,88
1.4	Диапазон пространственных частот, $\text{мм}^{-1}$	от 600 до 2400	от 600 до 1200	от 300 до 1200	от 60 до 200	от 75 до 3600
1.5	Рабочий спектральный диапазон, нм	от 30–80 до 190–900	от 30–90 до 200–1000	от 40–120 до 750–850	от 1000 до 2400	от 10 до 3300

№ п/п	Параметр ДОЭ	2. Голограммические технологии				
		Вогнутые решетки [6]	Вогнутые решетки [7]	Вогнутые решетки [14]	Аберрационно-корректированные вогнутые решетки для полихроматоров с плоским полем [16]	Аберрационно-корректированные вогнутые решетки для монохроматоров [16]
2.1	Диапазон размеров рабочей поверхности, мм	от Ø15 до Ø90	от 26×26 до Ø114,3	от Ø17 до Ø80	от Ø24 до 52×52	от 20×20 до 65×64
2.2	Диапазон радиусов кривизны рабочей поверхности, мм	от 80 до 6000	от 112,14 до 2217,6	от 75 до 393	от 55,5 до 191,4	от 99,9 до 257,6
2.3	Диапазон стрелок прогиба рабочей поверхности, мм	от 0,01 до 4,10	от 0,23 до 1,64	от 0,24 до 4,46	от 0,49 до 4,25	от 0,84 до 6,12
2.4	Диапазон пространственных частот, $\text{мм}^{-1}$	от 50 до 3600	от 83 до 4800	от 149 до 2500	от 240 до 1400	от 600 до 1300
2.5	Рабочий спектральный диапазон, нм	от 190–400 до 900–2500	от 60–150 до 4500–6000	от 170–290 до 1100–2500	от 190–800 до 850–1150	от 190–800 до 700–2000



Таблица. Продолжение

№ п/п	Параметр ДОЭ	2. Голографические технологии (продолжение)					
		Вогнутые решетки для спектрографов с плоским полем [17]	Вогнутые решетки для монохроматоров [17]	Вогнутые решетки для монохроматоров [18]	Вогнутые решетки с плоским полем [18]	Вогнутые решетки для спектрографов на круге Роуланда [19]	Вогнутые решетки для монохроматоров [19]
2.6	Диапазон размеров рабочей поверхности, мм	от Ø19 до Ø95	от 24×24 до Ø84	18×18	от Ø30 до Ø45	от 30×30 до Ø90	от 32×32 до Ø90
2.7	Диапазон радиусов кривизны рабочей поверхности, мм	от 80 до 575	от 74,73 до 203,9	50	от 55 до 100	от 60 до 1500	от 64 до 203,9
2.8	Диапазон стрелок прогиба рабочей поверхности, мм	от 0,52 до 4,94	от 1,63 до 4,37	1,65	от 1,13 до 2,68	от 0,34 до 8,02	от 2,28 до 5,03
2.9	Диапазон пространственных частот, мм <sup>-1</sup>	от 200 до 2197	от 570 до 1500	1200	от 164 до 954	от 150 до 3600	от 300 до 1200
2.10	Рабочий спектральный диапазон, нм	от 190–400 до 350–1050	от 190–700 до 1100–2500	от 260 до 450	от 190–850 до 1100–1900	от 100–300 до 500–700	от 100–300 до 800–3200

- коэффициенты неравномерности шага равны соответственно  $\alpha = -0,00278$ ,  $\beta = 2,702 \cdot 10^{-6}$ ,  $\Gamma = 6,433 \cdot 10^{-8}$ ,  $\Delta = 6,182 \cdot 10^{-10}$ ,  $\varepsilon = 9,304 \cdot 10^{-12}$ ;
- угол падения 5,7°, угол дифракции на 600 нм равен 19,157°, разворот нормали к поверхности изображения составляет 8,387°;
- изображение спектра длиной 28 мм формируется на вогнутой цилиндрической поверхности радиусом 47,6 мм;
- обратная линейная дисперсия 14,29 нм / мм;
- эквивалентное относительное отверстие 1:1,75.

Ширина аппаратной функции оптимизированной схемы на половине максимума составляет 100; 100 и 105,6 мкм для 400, 600 и 800 нм, соответственно. С учетом обратной линейной дисперсии спектральный предел разрешения равен 1,43; 1,43 и 1,51 нм для тех же контрольных длин волн. Для сравнения ширина аппаратной функции исходной схемы составляет 102,4;

137,6 и 172,8 мкм. Спектральный предел в этом случае равен 1,49; 2,00 и 2,51 нм. Таким образом, коррекция остаточных aberrаций, вводимая за счет использования переменного шага штрихов, позволяет повысить спектральное разрешение до 1,66 раза.

При световом диаметре решетки 58,6 мм получена максимальная расчетная стрелка прогиба её вогнутой рабочей поверхности – 4,54 мм. Как было показано выше, имеющиеся на практике нарезные (на основе применения классических делительных машин) и голографические технологии не могут решить задачу получения такой дифракционной структуры на столь крутой поверхности с большой стрелкой прогиба при сохранении высокой концентрации энергии в рабочем порядке дифракции и умеренного уровня рассеянного света. Это объясняется тем, что в нарезной технологии существуют принципиальные ограничения в конструкции и кинематике классических делительных машин, построенных по схеме Роуланда, а в голографической – ограничения по дифракционной эффективности.



Для технологических задач изготовления дифракционных решеток с подобными и большими (до 50 мм) стрелками прогиба рабочих поверхностей предлагается использовать новое техническое решение – делительные машины маятникового типа, что открывает возможность формообразования светосильных нарезных дифракционных решеток на выпуклых сферических и асферических поверхностях [22]. Общий вид предлагаемой делительной машины маятникового типа представлен на рисунке.

При этом вогнутая светосильная неклассическая дифракционная решетка с рассчитанными выше параметрами может быть изготовлена путем прецизионного копирования (на основе использования термо- или фотополимерных композиций [23]) с выпуклой нарезной решетки-матрицы, изготавливаемой на делительной машине маятникового типа. При таком подходе обеспечивается сравнительно высокое качество изображения и высокая дифракционная эффективность в компактной и простой схеме спектрографа, а также низкая себестоимость и высокая производительность, что особенно важно при серийном производстве единственного оптического элемента (вогнутой дифракционной решетки-реплики) в оптической схеме и прибора в целом.

Следует отметить, что задача формообразования нарезных ДОЭ с большой стрелкой прогиба на выпуклых цилиндрических поверхностях оптимально решается при помощи делительной машины маятникового типа, принципы построения которой также защищены патентом РФ [24].

Важным этапом в технологии формообразования светосильных ДОЭ является аттестация их параметров, включающая в себя контроль их оптического качества и дифракционной эффективности в рабочих порядках и в заданном спектральном диапазоне. Контроль оптического качества целесообразно осуществлять интерферометрическими методами и средствами как наиболее информативными. По результатам расшифровки соответствующих интерферограмм получают количественную информацию об основных параметрах исследуемых образцов ДОЭ – функцию рассеяния точки, функцию рассеяния линии, коэффициент Штреля, среднеквадратичное отклонение. Для определения дифракционной эффективности (абсолютной и относительной) используются известные фотометрические методы и средства измерений [25, 26].

Укажем перспективные области использования светосильных ДОЭ:

- спектральная часть аппаратуры для дистанционного зондирования Земли и исследований космических объектов [1, 2];
- оптические компоненты систем для компрессии мощных лазерных импульсов [27];
- компактные изображающие спектрографы [3];
- спектрографы на основе использования вогнутых цилиндрических дифракционных решеток [4];
- преобразователи солнечной энергии на основе цилиндрических ДОЭ;
- в качестве прецизионных мастер-матриц при серийном и массовом производстве спектральной аппаратуры;
- система юстировочных сегментов синтезированных ДОЭ для обеспечения процессов прецизионной сборки и юстировки в телескопостроении [28, 29].

В заключение следует отметить:

- из рассмотренных четырех технологий в настоящее время только нарезная и голографическая являются наиболее освоенными для изготовления светосильных ДОЭ;
- в силу специфики спектральных приборов космического базирования (для задач дистанционного зондирования Земли и исследований космических объектов), а также спектральной аппаратуры, предназначенной для использования в условиях малых световых потоков и/или в коротковолновой области спектра, в частности, на основе цилиндрических дифракционных решеток, на данный момент для нарезных светосильных ДОЭ альтернативы практически нет;
- для изготовления нарезных светосильных ДОЭ наиболее оптимальным и перспективным решением является использование делительной техники маятникового типа;
- для серийного производства спектральной аппаратуры на основе использования светосильных вогнутых отражательных дифракционных решеток с заданной дифракционной эффективностью, а также преобразователей солнечной энергии на основе цилиндрических светосильных ДОЭ целесообразно изначально изготавливать мастер-матрицы на выпуклых поверхностях с последующим процессом репликации.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Liu Ch., Straif Ch., Flügel-Paul Th., Zeitner U. D., Gross H. Optical design and tolerancing of a hyperspectral imaging spectrometer. *Proc. SPIE*. 2016. V. 9947. P. 994703-1-994703-9.
2. Kendrick S. E., Woodruff R. A., Hull T., Heap S. R., Kutyrev A., Danchi W., Purves L. Multiplexing in Astrophysics with a UV multi-object spectrometer on CETUS, a Probe-class mission study. *Proc. SPIE*. 2017; 10401: 1040111-1-1040111-9.
3. Мельников А. Н., Муслимов Э. Р. Анализ вариантов оптической схемы светосильного изображающего спектрографа, построенного на основе выпуклой голограммной дифракционной решетки. *Оптический журнал*. 2019; 86(3): 32–39.
4. Павлычева Н. К. Спектральные приборы с неклассическими дифракционными решетками. Казань: Изд-во КГТУ, 2003.
5. Корпорация «Hitachi Group». URL: <http://www.hitachi-hightech.com>.
6. Холдинг АО «Швабе» / АО «НПО ГИПО». Каталог оптической компонентной базы / URL: <http://shvabe.com/about/company/gosudarstvennyy-institut-prikladnoy-optiki/produktiya-gipo/opticheskie-materialy>.
7. Корпорация «HORIBA Jobin Yvon Ltd.» / URL: <http://www.horiba.com/scientific/products/diffraction-gratings/>.
8. Компания «ХолоГрайт». URL: <http://holograte.com/produktyi/golograficheskie-difrakcjonnyie-resheniya/difrakcjonnyie-reshetki-dlya-spektralnyix-priborov>.
9. Верхогляд А. Г., Завьялова М. А., Касторский Л. Б., Качкин А. Е., Кокарев С. А., Корольков В. П., Моисеев О. Ю., Полещук А. Г., Шиманский Р. В. Круговая лазерная записывающая система для изготовления ДОЭ на сферических поверхностях. *Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр.: Междунар. науч. конф. «СибОптика-2015»: сб. материалов в 3 т. Новосибирск: СГУГИТ, 2015; 2: 62–68.*
10. Компания «Altechna Company Group». URL: <http://www.altechna.com>.
11. Xu D., Owen J. D., Papa J. C., Reimers J., Suleski T. J., Troutman J. R., Davies M. A., Thompson K. P., Rolland J. P. Design, fabrication, and testing of convex reflective diffraction gratings. *Optics Express*. 2017; 25(13): 15252–15267.
12. Sukegawa T., Okura Yu., Nakayasu T. Commercial availability of astronomical machined gratings by Canon. *Proc. SPIE*. 2018; 10706: 107063L-1-107063L-6.
13. Zhou Q., Li L., Zeng L. A method to fabricate convex holographic gratings as master gratings for making flat-field concave gratings. *Proc. SPIE*. 2007; 6832: 68320W-1-68320W-9.
14. Компания Carl Zeiss Microscopy GmbH. URL: <http://www.zeiss.de/gratings>.
15. Компания Workshop of Photonics. URL: <http://www.wophotonics.com>.
16. Компания Shimadzu Corporation. URL: <http://www.shimadzu.com/opt/>
17. Компания Newport. URL: <http://www.gratinglab.com>
18. Компания Spectrum Scientific. URL: <http://www.ssi optics.com>
19. Компания GratingWorks. URL: <http://www.gratingworks.com>
20. Ai J., Du Q., Qin Zh., Liu J., Zeng X. Laser direct-writing lithography equipment system for rapid and μm-precision fabrication on curved surfaces with large sag heights. *Optics Express*. 2018; 26(16): 20965–20974.
21. Мельников А. Н., Лукин А. В., Муслимов Э. Р. Расчет параметров неплоских дифракционных решеток для компактных светосильных спектрографов. *Оптический журнал*. 2019; 86(6): 7–10.
22. Патент РФ № 2691821. Делительная машина маятникового типа для изготовления штриховых структур на неплоских рабочих поверхностях/Лукин А. В., Мельников А. Н.
23. Ахметов М. М., Белозёров А. Ф., Балоев В. А., Белокопытов А. А., Гайнутдинов И. С., Иванов В. П., Лукин А. В., Мельников А. Н., Могилюк И. А. Научно-производственный комплекс серийной прецессионной репликации элементов асферической и дифракционной оптики. *Контенант*. 2016; 15(3): 39–42.
24. Патент РФ на изобретение № 2687515. Делительная машина маятникового типа для изготовления штриховых структур на выпуклых цилиндрических поверхностях/Лукин А. В., Мельников А. Н.
25. Герасимов Ф. М., Яковлев Э. А. Дифракционные решетки/ Современные тенденции в технике спектроскопии. Новосибирск: Наука, 1982; 24–94.

# ЭССЕНТОПТИКС (||) ESSENTOPTICS

## PHOTON RT

Спектрофотометр для Оптиков | Spectrophotometer for Coaters



**185 – 5200 нм**

**АВТОМАТИЧЕСКОЕ ИЗМЕРЕНИЕ  
ПРОПУСКАНИЯ СЛОЖНЫХ  
СКЛЕЕК И ПРИЗМ**

**UNATTENDED TRANSMITTANCE  
MEASUREMENT OF COMPLEX  
CEMENTED PRISMS**

ООО «ЭссентОптика»  
23а-81, ул. 40 лет Победы, Боровляны, Минская обл., Минский р-н, 223053 Беларусь  
Тел.: +375-17-5112025 | Факс: +375-17-5112026 | [www.essentoptics.com](http://www.essentoptics.com)



## ТЕХНОЛОГИИ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

# АМПЕР 2019

## ИМПУЛЬСНЫЕ ЛАЗЕРЫ И ПРИМЕНЕНИЯ ЛАЗЕРОВ

ХIV  
МЕЖДУНАРОДНАЯ  
КОНФЕРЕНЦИЯ  
15-20 сентября 2019 года, Томск  
50 лет  
ИНСТИТУТУ  
ОПТИКИ  
АТМОСФЕРЫ

- газовые и плазменные лазеры, лазеры на парах металлов;
- фотоника оптических материалов, оптоэлектроника;
- биофотоника;
- фемтосекундные лазерные системы;
- лазерные системы, применения лазеров и новые лазерно-оптические технологии;
- некогерентные источники УФ- и ВУФ- излучения;
- преобразование лазерного излучения, оптоэлектронные устройства, нелинейная оптика;
- разряды для лазеров и некогерентных источников излучения.



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ТЕХНОСФЕРА» ПРЕДСТАВЛЯЕТ КНИГУ:



Цена 1300 руб.

### Цифровая обработка сигналов

Издание 3-е, исправленное

Оппенгейм А., Шафер Р.

при поддержке ОАО «РТИ»  
перевод с англ. под ред. д.э.н., проф. С. Ф. Боева

Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2019. – 1048 с., ISBN 978-5-94836-329-5

Предлагаемая вниманию читателя книга — третье переработанное издание всемирно известного классического учебника «Цифровая обработка сигналов», опубликованного в 1975 году. В ее основу лег развернутый курс по дискретной обработке сигналов, преподававшийся в течение ряда лет в Массачусетском технологическом институте.

Учебник посвящен математическим алгоритмам, реализуемым в цифровых системах. В нем опущены сложные доказательства математических утверждений, но все приемы и методы иллюстрированы многочисленными примерами и задачами.

Книга будет полезна как студентам, осваивающим предмет, так и инженерам-разработчикам и системотехникам.

### КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

125319, Москва, а/я 91; тел.: +7 495 234-0110; факс: +7 495 956-3346; e-mail: knigi@technosphera.ru; sales@technosphera.ru



26. Palmer C., Loewen E. *Difraction Grating Handbook*. Rochester: Newport Corporation, 2005.
27. Яковлев И. В. Стретчеры и компрессоры для сверхмощных лазерных систем. *Квантовая электроника*. 2014; 44(5): 393-414.
28. Балоев В. А., Иванов В. П., Ларинов Н. П., Лукин А. В., Мельников А. Н., Скочилов А. Ф., Чугунов Ю. П., Ураскин А. М. Прецisionный метод контроля юстировки двухзеркальных телескопов на основе использования системы кольцевых синтезированных голограмм. *Оптический журнал*. 2012; 79(3): 56-64.
29. Белоэров А., Ларинов Н., Лукин А., Мельников А. Осевые синтезированные голограммные оптические элементы: история развития, применения. Часть I. *Фотоника*. 2014; 46(4): 12-32.

## REFERENCE

1. Liu Ch., Straif Ch., Flügel-Paul Th., Zeitner U. D., Gross H. Optical design and tolerancing of a hyperspectral imaging spectrometer. *Proc. SPIE*. 2016. V. 9947. P. 994703-1-994703-9.
2. Kendrick S. E., Woodruff R. A., Hull T., Heap S. R., Kutyrev A., Danchi W., Purves L. Multiplexing in Astrophysics with a UV multi-object spectrometer on CETUS, a Probe-class mission study. *Proc. SPIE*. 2017; 10401: 104011-1-104011-9.
3. Mel'nikov A. N., Muslimov E. R. Analiz variantov opticheskoy skhemy svetosil'nogo izobrazhayushchego spektrografa, postroennogo na osnove vypukloj hologrammnoj difrakcionnoj reshetki. *Opticheskiy zhurnal*. 2019; 86(3): 32-39.
4. Pavlycheva N. K. Spektral'nye pribory s neklassicheskimi difrakcionnymi reshetkami. Kazan': Izd-vo KGTU. 2003.
5. URL: <http://www.hitachi-hightech.com>.
6. URL: <http://shvabe.com/about/company/gosudarstvennyy-institut-prikladnoy-optiki/produktiya-gipo/opticheskie-materialy>.
7. URL: <http://www.horiba.com/scientific/products/diffraction-gratings/>.
8. URL: <http://holograte.com/produkty/golograficheskie-difrakcionnye-resheniya-difrakcionnyie-reshetki-dlya-spektralnyix-priborov>.
9. Verhoglyad A. G., Zav'yalova M. A., Kastorskij L. B., Kachkin A. E., Kokarev S. A., Korol'kov V. P., Moiseev O. Yu., Poleschuk A. G., Shimanskij R. V. Krugovaya lazernaya zapisyvayushchaya sistema dlya izgotovleniya DOE na sfericheskikh poverhnostyah. Interekspo GEO-Sibir'-2015. HI Mezhdunar. nauch. kongr.: Mezhdunar. nauch. konf. 'SibOptika-2015': sb. materialov v 3 t. Novosibirsk: SGUGiT, 2015; 2: 62-68.
10. URL: <http://www.altechna.com>.
11. Xu D., Owen J. D., Papa J. C., Reimers J., Suleski T. J., Troutman J. R., Davies M. A., Thompson K. P., Rolland J. P. Design, fabrication, and testing of convex reflective diffraction gratings. *Optics Express*. 2017; 25(13): 15252-15267.
12. Sukegawa T., Okura Yu., Nakayasu T. Commercial availability of astronomical machined gratings by Canon. *Proc. SPIE*. 2018; 10706: 107063L-1-107063L-6.
13. Zhou Q., Li L., Zeng L. A method to fabricate convex holographic gratings as master gratings for making flat-field concave gratings. *Proc. SPIE*. 2007; 6832: 68320W-1-68320W-9.
14. URL: <http://www.zeiss.de/gratings>.
15. URL: <http://www.wophotonics.com>.
16. URL: <http://www.shimadzu.com/opt/>
17. URL: <http://www.gratinglab.com>
18. URL: <http://www.ssioptics.com>
19. URL: <http://www.gratingworks.com>
20. Ai J., Du Q., Qin Zh., Liu J., Zeng X. Laser direct-writing lithography equipment system for rapid and  $\mu\text{m}$ -precision fabrication on curved surfaces with large sag heights. *Optics Express*. 2018; 26(16): 20965-20974.
21. Mel'nikov A. N., Lukin A. V., Muslimov E. R. Raschet parametrov neploskih difrakcionnyh reshetok dlya kompaktnyh svetosil'nyh spektrografov. *Opticheskij zhurnal*. 2019; 86(6): 7-10.
22. Patent RF № 2691821. Delitel'naya mashina mayatnikovogo tipa dlya izgotovleniya shtrihovyh struktur na neploskih rabochih poverhnostyah/Lukin A. V., Mel'nikov A. N.
23. Ahmetov M. M., Belozyorov A. F., Baloev V. A., Belokopytov A. A., Gajnutdinov I. S., Ivanov V. P., Lukin A. V., Mel'nikov A. N., Mogilyuk I. A. Nauchno-proizvodstvennyj kompleks serijnoj precizionnoj replikacii elementov asfericheskoi difrakcionnoj optiki. *Kontenant*. 2016; 15(3): 39-42.
24. Patent RF № 2687515. Delitel'naya mashina mayatnikovogo tipa dlya izgotovleniya shtrihovyh struktur na vypuklyh cilindricheskikh poverhnostyah/Lukin A. V., Mel'nikov A. N.
25. Gerasimov F. M., Yakovlev E. A. Difrakcionnye reshetki/Sovremennye tendencii v tekhnike spektroskopii. Novosibirsk: Nauka, 1982; 24-94.
26. Palmer C., Loewen E. *Difraction Grating Handbook*. Rochester: Newport Corporation, 2005.
27. Yakovlev I. V. Stretchers and compressors for heavy duty laser systems. *Quantum Electronics*. 2014; 44(5): 393-414.
28. Baloev V. A., Ivanov V. P., Larionov N. P., Lukin A. V., Mel'nikov A. N., Skochilov A. F., Chugunov Yu. P., Uraskin A. M. Precizionnyj metod kontrolya yustirovki dvuhzerkal'nyh teleskopov na osnove ispol'zovaniya sistemy kol'cevyh sintezirovannyh hologramm. *Opticheskij zhurnal*. 2012; 79(3): 56-64.
29. Belozyorov A. F., Larionov N. P., Lukin A. V., Mel'nikov A. N. Osevye sintezirovannye hologrammnye opticheskie elementy: istoriya razvitiya, primeniya. Part I. *Photonics Russia*. 2014; 4 (46): 12-32.



Вакуумное оборудование  
для оптики и  
микроэлектроники



Проектирование и  
производство вакуумных  
напылительных  
установок «под ключ»

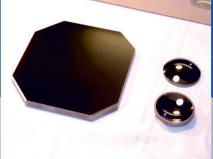


Изготовление  
технологических  
устройств

ООО «Изовак», ул. М. Богдановича, 155-907,  
220040, Минск, Беларусь, тел.: +375 17 293 18 42,  
факс: +375 17 2931845



Разработка и изготовление  
тонкопленочных изделий



Разработка технологий  
формирования тонких  
пленок



Оптические элементы



Напылительный сервис



Сложные и уникальные  
покрытия