

9. Светосильные дифракционные оптические элементы: особенности технологий изготовления, аттестация, перспективные области применения

А. В. Лукин, А. Н. Мельников

АО «НПО «Государственный институт прикладной оптики», Казань, Россия

В докладе рассмотрены особенности технологий изготовления, вопросы аттестации и перспективные области применения светосильных дифракционных оптических элементов. Для ряда приложений необходимо иметь возможность изготавливать светосильные нарезные дифракционные решетки с большой стрелкой прогиба рабочей поверхности, что на практике недостижимо с использованием имеющегося технологического оборудования. Предлагается техническое решение, открывающее возможность расширить номенклатуру светосильных дифракционных оптических элементов, на основе применения делительной машины маятникового типа с последующим реплицированием дифракционной структуры в полимерном слое.

Ключевые слова: Светосильные дифракционные оптические элементы, Технологии изготовления, Аттестация, Области применения, Светосильный компактный спектрограф, Делительная машина маятникового типа, Мастер-матрица, Реплицирование, Фотополимеры.

Цитирование: Лукин, А. В. Светосильные дифракционные оптические элементы: особенности технологий изготовления, аттестация, перспективные области применения / А. В. Лукин, А. Н. Мельников // HOLOEXPO 2019 : XVI международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019. — С. 48–53.

При создании компактной и светосильной аналитической спектральной аппаратуры для ряда ведущих областей науки, техники и промышленности (фундаментальные исследования, дистанционное зондирование Земли из космоса, экологический мониторинг, контроль состава веществ и др.) необходимо использовать отражательные и пропускающие светосильные дифракционные оптические элементы (ДОЭ) с высокой дифракционной эффективностью на выпуклых и вогнутых рабочих поверхностях с большой стрелкой прогиба (большой крутизной) рабочей поверхности [1–3]. Подобные ДОЭ обладают как диспергирующими свойствами, так и оптической силой, что позволяет минимизировать количество оптических элементов, применяемых в схемах спектральной аппаратуры, и это, в свою очередь, увеличивает отношение «сигнал/шум» на выходе оптической системы.

В настоящее время ДОЭ подобного типа изготавливаются на основе применения следующих технологий [4–15]:

- нарезная технология, реализуемая с использованием делительных машин и высокоточных токарных станков с ЧПУ;
- голографические технологии;

Таблица 1. Текущий уровень развития технологий изготовления нарезных и голограммных дифракционных решеток, доступных коммерчески

№ п/п	Параметр ДОЭ	Нарезная классическая технология		
		Аберрационно-скорректированные вогнутые нарезные дифракционные решетки для высокоразрешающего монохроматора Seaya-Namioka [4]	Аберрационно-скорректированные вогнутые нарезные дифракционные решетки для компактного высокоэффективного монохроматора [4]	Аберрационно-скорректированные вогнутые нарезные дифракционные решетки для спектрографов с плоским полем [4]
1.	Диапазон размеров рабочей поверхности, мм	от 21×16 до 72×76	от 16×16 до 56×96	от 5×5 до 46×46
2.	Диапазон радиусов кривизны поверхности, мм	от 200 до 1000	от 80 до 3000	от 50 до 500
3.	Диапазон стрелок прогиба, мм	от 0,16 до 0,72	от 0,13 до 0,91	от 0,06 до 0,53
4.	Диапазон числа штрихов на мм	от 600 до 2400	от 600 до 1200	от 300 до 1200
5.	Рабочий спектральный диапазон, нм	от 190–900 до 30–80	от 200–1000 до 30–90	от 750–850 до 40–120
№ п/п	Параметр ДОЭ	Голографическая технология		
		Каталог АО «НПО ГИПО» [5]	Каталог корпорации HORIBA Jobin Yvon Ltd. [6]	Каталог компании Carl Zeiss Microscopy GmbH [13]
1.	Диапазон размеров рабочей поверхности, мм	от Ø15 до Ø90	от 26×26 до Ø114,3	от Ø17 до Ø80
2.	Диапазон радиусов кривизны поверхности, мм	от 80 до 6000	от 112,14 до 2217,6	от 75 до 393
3.	Диапазон стрелок прогиба, мм	от 0,01 до 4,1	от 0,23 до 1,64	от 0,24 до 4,46
4.	Диапазон числа штрихов на мм	от 50 до 3600	от 83 до 4800	от 149 до 2500
5.	Рабочий спектральный диапазон, нм	от 190–400 до 900–2500	от 60–150 до 4500–6000	от 170–290 до 1100–2500

- фотолитографические технологии;
- 3D-технологии полимеризации в фотополимерных материалах.

Существуют области применения спектральной аппаратуры некосмического базирования, когда допускается и целесообразно использование ДОЭ-реплик.

В качестве иллюстрации в таблице приведены параметры нарезных и голограммных дифракционных решеток стандартного ряда, предлагаемых в каталогах некоторых фирм в

настоящее время; из таблицы видно, что наибольшее значение стрелки прогиба дифракционных решеток составляет 4,46 мм.

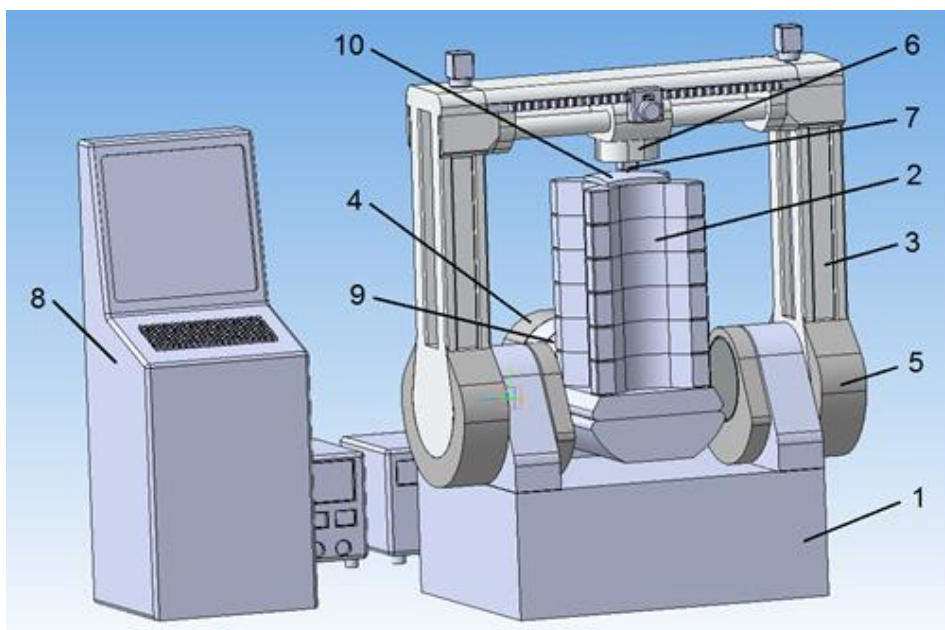
Анализ литературных данных показывает, что наиболее перспективным направлением, обеспечивающим возможность создания светосильных ДОЭ с высокой дифракционной эффективностью, является реализация нарезных технологий на основе разработки нового уникального технологического оборудования.

Рассматривается пример расчета и оптимизации оптической схемы компактного светосильного спектрографа, построенного на основе использования вогнутой отражательной неклассической нарезной дифракционной решетки [16]. Оптимизированные параметры оптической схемы спектрографа следующие:

- пространственная частота штрихов решетки в вершине 712 штр./мм;
- коэффициенты неравномерности шага равны, соответственно, $\alpha = -0,00278$, $\beta = 2,702 \times 10^{-6}$, $\Gamma = 6,433 \times 10^{-8}$, $\Delta = 6,182 \times 10^{-10}$, $\varepsilon = 9,304 \times 10^{-12}$;
- угол падения $5,7^\circ$, угол дифракции на 600 нм — $19,157^\circ$, разворот нормали к поверхности изображения — $8,387^\circ$;
- 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 — необходимо использовать технологически сложную дополнительную операцию для получения треугольного профиля штриха записанной голограммой рельефно-фазовой структуры с целью повышения дифракционной эффективности в рабочем спектральном диапазоне.



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

Рис. 1. Основные узлы и элементы делительной машины маятникового типа

Для технологических задач изготовления дифракционных решеток с подобными и большими (более 5 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 [17]. 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) [18] 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.

Аттестация параметров светосильных ДОЭ включает 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 [19, 20].

Перспективные области применения светосильных ДОЭ следующие:

- спектральная часть аппаратуры для дистанционного зондирования Земли и исследований космических объектов;
- оптический узел в аппаратуре для компрессии мощных лазерных импульсов;
- компактные изображающие спектрофотометры;
- в роли мастер-матрицы при серийном производстве спектральной аппаратуры на основе использования вогнутых отражательных дифракционных решеток;
- система юстировочных сегментов для достижения прецизионной юстировки зеркальных телескопических систем как наземного, так и космического базирования [21, 22].

В качестве заключения следует отметить:

- из рассмотренных четырех технологий в настоящее время только нарезная и голографическая являются наиболее приспособленными для изготовления светосильных ДОЭ;
- в силу специфики спектральных приборов космического базирования (для задач дистанционного зондирования Земли и исследований космических объектов) и обеспечения высокой дифракционной эффективности на данный момент для светосильных нарезных ДОЭ альтернативы практически нет;
- для изготовления светосильных нарезных ДОЭ наиболее оптимальным и перспективным решением является использование делительных машин маятникового типа;
- для серийного производства спектральной аппаратуры на основе использования светосильных вогнутых отражательных дифракционных решеток с заданной дифракционной эффективностью целесообразно изначально изготавливать мастер-матрицы на выпуклых поверхностях с последующим процессом репликации.

Список источников

- [1] **Liu, Ch.** Optical design and tolerancing of a hyperspectral imaging spectrometer / Ch. Liu, Ch. Straif, Th. Flügel-Paul, U. D. Zeitner, H. Gross // Proc. of SPIE. — 2016. — Vol. 9947. — P. 994703.
- [2] **Kendrick, S. E.** Multiplexing in Astrophysics with a UV multi-object spectrometer on CETUS, a Probe-class mission study / S. E. Kendrick, R. A. Woodruff, T. Hull, S. R. Heap, A. Kuttyrev, W. Danchi, L. Purves // Proc. of SPIE. — 2017. — Vol. 10401. — P. 1040111-1–1040111-9.
- [3] **Мельников, А. Н.** Анализ вариантов оптической схемы светосильного изображающего спектрографа, построенного на основе выпуклой голограммной дифракционной решетки / А. Н. Мельников, Э. Р. Муслимов // Оптический журнал. — 2019. — Том 86. — № 3. — С. 32–39.
- [4] **Корпорация Hitachi Group** / URL: <http://www.hitachi-hightech.com>.
- [5] **Холдинг АО «Швабе»** / АО «НПО ГИПО» / Каталог оптической компонентной базы / URL: <http://shvabe.com/about/company/gosudarstvennyy-institut-prikladnoy-optiki/produktsiya-gipo/opticheskie-materialy>.

- [6] **Корпорация HORIBA Jobin Yvon Ltd.** / URL: <http://www.horiba.com/scientific/products/diffraction-gratings/for-industrial-applications>.
- [7] **ООО «ХолоГрэйт»** / URL: <http://holograte.com/produktyi/golograficheskie-difrakzionnyie-resheniya-difrakzionnyie-reshetki-dlya-spektralnyix-priborov>.
- [8] **Верхогляд, А. Г.** Круговая лазерная записывающая система для изготовления ДОО 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. XI Междунар. науч. конгр.: Междунар. науч. конф. «СибОптика-2015»: сб. материалов в 3 т. — Новосибирск: СГУГиТ, 2015. — Том 2. — С. 62–68.
- [9] **Компания Altechna Company Group** / URL: <http://www.altechna.com>.
- [10] **Xu, D.** Design, fabrication, and testing of convex reflective diffraction gratings / D. Xu, J. D. Owen, J. C. Pava, J. Reimers, T. J. Suleski, J. R. Troutman, M. A. Davies, K. P. Thompson, J. P. Rolland // Optics Express. — 2017. — Vol. 25. — № 13. — P. 15252–15267.
- [11] **Sukegawa, T.** Commercial availability of astronomical machined gratings by Canon / T. Sukegawa, Yu. Okura, T. Nakayasu // Proc. of SPIE. — 2018. — Vol. 10706. — P. 107063L.
- [12] **Zhou, Q.** A method to fabricate convex holographic gratings as master gratings for making flat-field concave gratings / Q. Zhou, L. Li, L. Zeng // Proc. of SPIE. — 2007. — Vol. 6832. — P. 68320W.
- [13] **Компания Carl Zeiss Microscopy GmbH** / URL: <http://www.zeiss.de/gratings>.
- [14] **Компания Workshop of Photonics** / URL: <http://www.wophotonics.com>.
- [15] **Компания Shimadzu Corporation** / URL: <http://www.shimadzu.com/opt/>
- [16] **Мельников, А. Н.** Расчет параметров неплоских дифракционных решеток для компактных светосильных спектрографов / А. Н. Мельников, А. В. Лукин, Э. Р. Муслимов // Оптический журнал. — 2019. — Том 86. — № 6. — С. 7–10.
- [17] **Патент РФ** на полезную модель № 185039 от 19.11.2018 г. Делительная машина маятникового типа для изготовления штриховых структур на неплоских рабочих поверхностях / А. В. Лукин, А. Н. Мельников. — Дата приоритета 26.02.2018 г.
- [18] **Ахметов, М. М.** Научно-производственный комплекс серийной прецизионной репликации элементов асферической и дифракционной оптики / М. М. Ахметов, А. Ф. Белозёров, В. А. Балоев, А. А. Белокопытов, И. С. Гайнутдинов, В. П. Иванов, А. В. Лукин, А. Н. Мельников, И. А. Могилюк // Контенант. — 2016. — Том 15. — № 3. — С. 39–42.
- [19] **Герасимов, Ф. М.** Дифракционные решетки / Современные тенденции в технике спектроскопии / Ф. М. Герасимов, Э. А. Яковлев. — Новосибирск: Наука, 1982. — С. 24–94.
- [20] **Palmer, C.** Diffraction Grating Handbook / C. Palmer, E. Loewen. — Rochester: Newport Corporation, 2005. — 271 p.
- [21] **Балоев, В. А.** Прецизионный метод контроля юстировки двухзеркальных телескопов на основе использования системы кольцевых синтезированных голограмм / В. А. Балоев, В. П. Иванов, Н. П. Ларионов, А. В. Лукин, А. Н. Мельников, А. Ф. Скочилов, Ю. П. Чугунов, А. М. Ураскин // Оптический журнал. — 2012. — Том 79. — № 3. — С. 56–64.
- [22] **Белозёров А.** Осевые синтезированные голограммные оптические элементы: история развития, применения. Часть I / А. Белозёров, Н. Ларионов, А. Лукин, А. Мельников // Фотоника. — 2014. — № 4. — С. 12–32.