

# Усовершенствование способа формообразования неклассических нарезных дифракционных решёток на основе применения делительной машины маятникового типа

*А. Н. Мельников*

Акционерное общество «Научно-производственное объединение «Государственный институт прикладной оптики», Казань, Россия

В докладе предложено техническое решение по усовершенствованию способа формообразования неклассических нарезных дифракционных решёток на основе применения делительной машины маятникового типа с учётом модификации принципов её построения. Приведены аналитические выражения, описывающие закономерности изменений основных геометрических параметров криволинейных проекций штрихов этих решёток.

*Ключевые слова:* Нарезная дифракционная решётка, Неклассическая дифракционная решётка, Сферическая дифракционная решётка, Способ формообразования, Усовершенствование, Делительная машина маятникового типа, Геометрические параметры штриха.

*Цитирование:* Мельников, А. Н. Усовершенствование способа формообразования неклассических нарезных дифракционных решёток на основе применения делительной машины маятникового типа / А. Н. Мельников // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 363–370.

## Актуальность

Известно [1–3], что эффективная компенсация астигматизма в оптических схемах спектральных приборов достигается не только за счёт применения в них дифракционных решёток (ДР) на вогнутых асферических поверхностях, но и за счёт формирования системы криволинейных проекций штрихов (КПШ) сферических и тороидальных ДР (СДР и ТДР). Показано, что в рамках технических решений на основе использования делительных машин маятникового типа (ДММТ) [4–9] в плоскости, касательной к вершине СДР (или ТДР), образуется система КПШ, радиусы кривизны ближайших вершинных окружностей которых обратно пропорциональны заданной координате, что ведёт к снижению возможностей по компенсации аберраций. Решение задачи по расширению практических возможностей компенсации аберраций спектральных приборов является актуальной.

## Исходные принципы построения делительных машин маятникового типа

Обратимся к исходным принципам построения ДММТ [4–7]:

- резцовая каретка (РК) выполнена в виде маятника, на котором закреплен механизм подъёма и опускания алмазного резца (АР);
- геометрические оси опор вращения РК и делительной каретки (ДК) ортогональны между собой и пересекаются в пространстве;

– РК и ДК предполагают в своём составе наличие телескопических механизмов, что позволит проводить необходимую настройку и обеспечить такую траекторию движения АР, которая бы практически повторяла радиус кривизны рабочей поверхности подложки дифракционной решётки;

– при изготовлении дифракционных структур на выпуклых подложках АР расположен выше оси вращения РК, а сама подложка – выше оси вращения ДК;

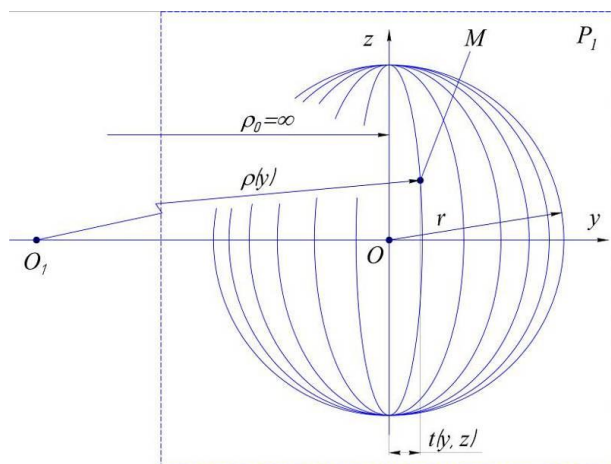
– привод перемещения ДК выполнен с возможностью обеспечения поворота ДК относительно её оси вращения и оснащён соответствующим датчиком поворота;

– привод перемещения РК выполнен с возможностью обеспечения угловых автоколебаний РК относительно её оси вращения;

– блок управления синхронизирует работу всех приводов и механизма подъёма и опускания АР;

– центр масс РК расположен ниже оси её вращения в целях обеспечения устойчивости её динамики в процессе формообразования штрихов.

Как следует из приведённого ранее описания работы ДММТ [4–7], для наиболее общего случая, когда подложка СДР представляет собой выпуклую полусферу радиусом кривизны  $r$ , система КПШ на плоскость  $P_1$ , касательную к вершине этой решётки, соответствует рис.1.



т.  $O$  – центр кривизны подложки СДР в виде полусферы радиусом кривизны  $r$ , т.  $M$  – произвольная точка в пределах рассматриваемой КПШ,  $\rho(y)$  – радиус кривизны ближайшей вершинной окружности с центром в т.  $O_1$ , с помощью которой аппроксимируется рассматриваемая КПШ эллиптической формы в т.  $M$ ,  $\rho_0$  – радиус кривизны ближайшей вершинной окружности КПШ, проходящей через вершину СДР,  $t(y, z)$  – стрелка прогиба рассматриваемой КПШ в т.  $M$

**Рис. 1.** К описанию КПШ СДР [7]

Соотношения для описания основных геометрических параметров КПШ СДР получены в [7] и представлены в виде формул (1) – (3). Описание изменения формы КПШ в виде эллипсов в системе координат  $Oyz$

$$\frac{y^2}{r^2 \sin^2 \varphi_i} + \frac{z^2}{r^2} = 1, \quad (1)$$

где  $\varphi_i$  – текущий угол сечения полусферы плоскостью (проходящей через центр полусферы), в которой перемещается АР для нанесения текущего штриха на сферической поверхности решётки.

Описание изменения радиуса кривизны ближайшей вершинной окружности, с помощью которой аппроксимируется КПШ эллиптической формы в произвольной т. М, как функции зависимости от изменения координаты у

$$\rho(y) = r^2/y. \quad (2)$$

Описание изменения переменного шага КПШ как функции зависимости от изменения координаты у

$$e \cong e_0(1 - 0,5r^{-2}y^2), \quad (3)$$

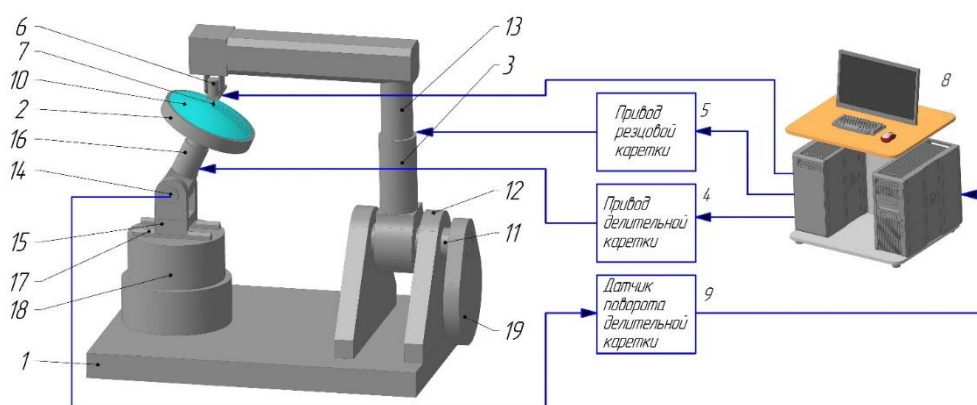
где  $e_0$  — значение первого периода в принятой системе КПШ, равное значению постоянного линейного шага штриховой структуры, наносимой на поверхности подложки СДР.

### Предлагаемое техническое решение

В целях расширения возможностей компенсации aberrаций СДР и ТДР за счёт формообразования системы КПШ с кривизной одного знака их ближайших вершинных окружностей с учётом того, что кривизна ближайшей вершинной окружности проекции центрального штриха не равна  $\infty$ , предлагается использовать ДММТ [4], модифицируя основные принципы её построения и функционирования:

- а) должно быть обеспечено перекрещивание между собой осей поворота РК и ДК;
- б) конструкция ДК должна содержать механизм перемещения и фиксации оси поворота ДК (в горизонтальной плоскости) для смещения этой оси на заданное расстояние от плоскости, в которой перемещается АР при нарезке штрихов;
- в) конструктивные параметры РК по высоте должны быть больше радиуса кривизны СДР (или радиуса кривизны ТДР в меридиональном сечении).

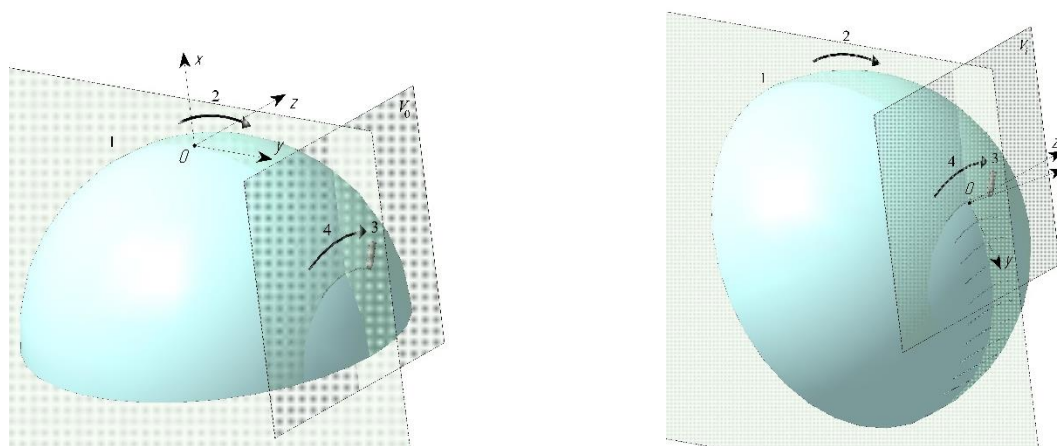
Один из возможных вариантов реализации предложенной модификации ДММТ представлен на рис. 2 в виде упрощённой блок-схемы.



1 — станина, 2 — ДК, 3 — РК, 4 — привод ДК, 5 — привод РК, 6 — механизм подъёма и опускания АР, 7 — АР, 8 — блок управления исполнительными устройствами, 9 — датчик поворота ДК, 10 — подложка изготавливаемой ДР, 11 — ось РК, 12 — опоры вращения РК, 13 — телескопический механизм РК, 14 — ось ДК, 15 — опоры вращения ДК, 16 — телескопический механизм ДК, 17 — направляющие линейного перемещения ДК для настроечно-юстировочных работ, 18 — механизм вертикальных линейных подвижек направляющих 17 для настроечно-юстировочных работ, 19 — противовес РК

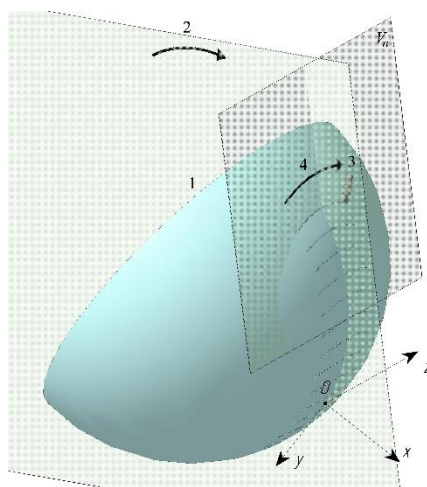
**Рис. 2.** Упрощённая блок-схема модифицированной ДММТ для изготовления неклассических нарезных СДР и ТДР

Использование предложенного модифицированного варианта построения и функционирования ДММТ приведёт к изменению получаемой общей картины формируемых штрихов на рабочей поверхности подложки СДР (ТДР) и, как следствие, к изменению общей картины КПШ в плоскости  $P_1$ , касательной к вершине подложки, в сравнении с рис. 1. На рис. 3 представлены примеры формообразования штрихов для трёх сечений для наиболее общего случая выпуклой СДР, подложка которой имеет форму полусферы с радиусом кривизны  $r$ .



а) формообразование «нулевого» штриха в плоскости  $V_0$  движения АР

б) формообразование  $i$ -го штриха в плоскости  $V_i$  движения АР



в) формообразование  $n$ -го штриха в плоскости  $V_n$  движения АР

1 — подложка СДР, 2 — траектория поворота подложки СДР относительно центра её кривизны,  
3 — АР, 4 — траектория движения АР

**Рис. 3.** Примеры формообразования штрихов для трёх сечений на поверхности выпуклой СДР (при этом плоскости  $V_0$ ,  $V_i$  и  $V_n$  геометрически полностью между собой совпадают)

### Вывод аналитических зависимостей

В целях получения математического описания коэффициентов aberrаций и в дальнейшем их оптимизации необходимо сначала вывести аналитические выражения, характеризующие основные геометрические параметры КПШ на примере изготовления СДР, которые могут быть сформированы с помощью предложенного модифицированного варианта построения и функционирования ДММТ и могут рассматриваться как спроецированные на плоскости  $P_1$ , касательной к вершине подложки СДР, а именно:

- уравнение криволинейных проекций штрихов и закономерность его изменения;
- радиус кривизны ближайшей вершинной окружности, аппроксимирующей КПШ, и закон его изменения;
- закон изменения шага КПШ.

Уравнение криволинейных проекций штрихов. Запишем уравнение прямой, выражаемое в виде

$$y \cos \alpha_i + x \sin \alpha_i - R_V = 0, \quad (4)$$

где  $R_V$  и  $\alpha_i$  – текущие полярные координаты (в плоскости  $Oxy$ ), используемые для описания положения рассматриваемой плоскости сечения, в которой сформирован текущий штрих.

Запишем систему уравнений

$$\begin{cases} x^2 + y^2 + z^2 = r^2, \\ y \cos \alpha_i + x \sin \alpha_i - R_V = 0 \end{cases} \quad (5)$$

Из системы уравнений (5) исключим координату  $x$ , следовательно, получаем уравнение КПШ на плоскости  $Oyz$  (касательной к вершине выпуклой СДР), что эквивалентно исходной задаче

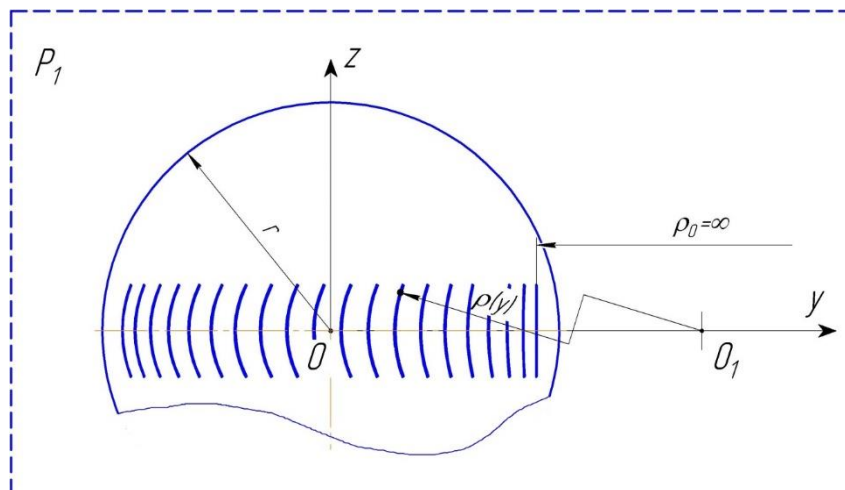
$$\left( \left( \frac{R_V}{\sin \alpha_i} \right) - \left( \frac{y \cos \alpha_i}{\sin \alpha_i} \right) \right)^2 + y^2 + z^2 = r^2 \quad (6)$$

Из выражения (6) нетрудно получить уравнение кривой 2-го порядка

$$\frac{(y - R_V \cos \alpha_i)^2}{(r^2 - R_V^2) \sin^2 \alpha_i} + \frac{z^2}{(r^2 - R_V^2)} = 1, \quad (7)$$

где  $r$  – радиус кривизны СДР (причём  $R_V < r$ ).

Из уравнения (7) следует, что КПШ на плоскость  $Oyz$  имеют вид эллипсов (см. рис. 4).



т.  $O$  – центр кривизны подложки СДР в виде полусферы радиусом кривизны  $r$ ,  $\rho(y)$  – радиус кривизны ближайшей вершинной окружности с центром в т.  $O_1$ , с помощью которой аппроксимируется рассматриваемая КПШ эллиптической формы для заданной точки,  $\rho_0$  – радиус кривизны ближайшей вершинной окружности для начальной КПШ

**Рис. 4.** СДР с картиной КПШ (вид на плоскость  $P_1$ )

*Радиус кривизны ближайшей вершинной окружности.* Выведем математическое выражение, описывающее изменение радиуса кривизны полученной картины КПШ в зависимости от координаты  $y$  на основе так называемого радиуса кривизны ближайшей вершинной окружности  $\rho(y)$ .

В соответствии с [10] любой эллипс можно аппроксимировать ближайшей вершинной окружностью с радиусом кривизны

$$\rho = b^2/a. \quad (8)$$

В рассматриваемом случае  $b = \sqrt{r^2 - R_V^2}$ ,  $a = \left(\sqrt{r^2 - R_V^2}\right) \sin \alpha_i$ .

Поскольку  $\sin \alpha_i$  нетрудно представить в виде функции  $f(y_i)$ , то искомый радиус кривизны ближайшей вершинной окружности  $\rho_i(y_i)$  можно получить из выражения (8) в следующем виде

$$\rho_i(y_i) = \rho_0 - py_i - qy_i^2 - sy_i^3 - ty_i^4, \quad (9)$$

где  $\rho_0 = r \left(\sqrt{r^2 - R_V^2}\right)/R_V$ ,  $p = (R_V^2 - r^2)/R_V^2$ ,  $q = \left(\sqrt{r^2 - R_V^2}\right)(R_V^2 - 2r^2)/2rR_V^3$ ,  $s = (R_V^2 - r^2)/R_V^4$ ,  $t = \left(\sqrt{r^2 - R_V^2}\right)(4r^2R_V^2 + R_V^4 - 8r^4)/8r^3R_V^5$ .

*Закон изменения шага.* Для получаемой картины КПШ СДР определим закономерность изменения шага, равного расстоянию между проекциями соседних штрихов, рассматриваемыми на плоскости  $P_1$ , касательной к поверхности СДР в её центре. Поскольку шаг  $e_{pri}$  есть кратчайшее расстояние между ближайшими соседними КПШ вдоль оси  $Oy$  (при этом  $z = 0$ ), то запишем

$$e_{pri+1} = y_{i+1} - y_i. \quad (10)$$

Используя алгоритм, аналогичный применённому в [7, 9], с учётом выведенного выражения (7), после выполнения ряда преобразований, получим конечное математическое выражение для описания переменного шага  $e_{pri}$  КПШ СДР в виде, удобном для выполнения моделирования коэффициентов аберраций,

$$e_{pri}(y_i) \cong e_0(1 - 0,5r^{-2}y_i^2 - 0,125r^{-4}y_i^4), \quad (11)$$

где  $e_0$  – значение периода штрихов в вершине выпуклой СДР.

## Выводы

1. Представленные нами ранее технические решения в области технологии изготовления неклассических нарезных СДР и ТДР на основе использования ДММТ имеют ограничения в части обеспечения возможностей по компенсации аберраций оптических схем спектральных приборов.

2. Предлагается решить эту актуальную проблему по расширению компенсационных возможностей неклассических нарезных решёток за счёт введения ряда усовершенствований в принципы построения и функционирования ДММТ и, соответственно, модернизации способа нанесения штриховой структуры этих решёток.

3. На примере выпуклых неклассических нарезных СДР, для которых учитываются особенности предложенного усовершенствованного способа формообразования их штриховых структур и изменения кинематики движения основных механизмов усовершенствованной ДММТ, представлен вывод математических выражений (7), (9) и (11) соответственно для описания формы КПШ, радиусов кривизны их ближайших вершинных окружностей и переменного шага, что открывает путь для расширения практических возможностей по компенсации aberrаций оптических систем спектральных приборов согласно известным методикам [2, 3]. Для реализации серийного производства вогнутых СДР-реплик необходимо применять прецизионное реплицирование на основе полимерных композиций холодного отверждения [10–12].

### Список источников

- [1] **Пейсахсон, И. В.** Оптика спектральных приборов / И. В. Пейсахсон. — Л.: Машиностроение, 1975. — 312 с.
- [2] **Бажанов, Ю. В.** Фокусирующие дифракционные решётки и их aberrационные свойства. Приборы на их основе / Ю. В. Бажанов // Автореф. дис. ... доктора технических наук: 01.04.05 / Гос. оптич. ин-т. — Казань, 2004. — 34 с.
- [3] **Павлычева, Н. К.** Дифракционные решетки для спектральных приборов. Обзор / Н. К. Павлычева // Оптический журнал. — 2022. — Том 89. — № 3. — С. 28–41. — DOI: 10.17586/1023-5086-2022-89-03-28-41
- [4] **Патент на изобретение № 2691821 РФ.** Делительная машина маятникового типа для изготовления штриховых структур на неплоских рабочих поверхностях / А. В. Лукин, А. Н. Мельников. — Заяв. 26.02.2018. — Опубл. 18.06.2019.
- [5] **Мельников, А. Н.** Технологии формообразования светосильных дифракционных оптических элементов на основе использования делительной техники маятникового типа / А. Н. Мельников // Фотоника. — 2019. — Том 13. — № 5. — С. 468–475. — DOI:10.22184/1993-7296.FRos.2019.13.5.468.475
- [6] **Патент на изобретение № 2725324 РФ.** Делительная машина маятникового типа для изготовления штриховых структур на вогнутых поверхностях / А. Н. Мельников. — Заяв. 31.05.2019. — Опубл. 02.07.2020.
- [7] **Бажанов, Ю. В.** Новые возможности получения неклассических нарезных дифракционных решеток большой апертуры / Ю. В. Бажанов, А. В. Лукин, А. Н. Мельников // Оптический журнал. — 2021. — Том 88. — № 9. — С. 44–51. — DOI:10.17586/1023-5086-2021-88-09-44-51
- [8] **Мельников, А. Н.** Новый подход в задаче формообразования тороидальных дифракционных решёток / А. Н. Мельников // XI Международная конференция по фотонике и информационной оптике: Сб. научн. трудов. — М.: НИЯУ МИФИ, 2022. — С. 181–182.
- [9] **Мельников, А. Н.** Новые принципы формирования штриховых структур светосильных неклассических нарезных тороидальных дифракционных решёток с применением делительных машин маятникового типа / А. Н. Мельников // Оптический журнал. — 2022. — Том 89. — № 10. — С. 95–105. — DOI: 10.17586/1023-5086-2022-89-10-95-105
- [10] **Окатов, М. А.** Справочник технолога-оптика / М. А. Окатов, Э. А. Антонов, А. Байгожин и др.; Под ред. М. А. Окатова. — СПб.: Политехника, 2004. — 679 с.

- [11] **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.
- [12] **Лукин, А. В.** Прецизионное реплицирование всех видов оптических поверхностей – научно-технологическая основа кардинальных преобразований в современном оптическом производстве / А. В. Лукин, А. Н. Мельников // Оптический журнал. — 2022. — Том 89. — № 10. — С. 42–50. — DOI: 10.17586/1023-5086-2022-89-10-42-50

## **Improving the shaping method of non-classical ruled diffraction gratings based on the use of a pendulum-type ruling engine**

*A. N. Melnikov*

JSC «Scientific and Production Association «State Institute of Applied Optics», Kazan, Russia

The report proposes a technical solution meant to improve the shaping method of non-classical ruled diffraction gratings based on the use of a pendulum-type ruling engine with a modification of its design principles. It lists the analytical expressions describing the modification patterns of the main geometric parameters of the curvilinear projections of the grooves on these gratings.

*Keywords:* Ruled diffraction grating, Non-classical diffraction grating, Spherical diffraction grating, Shaping method, Improving, Pendulum-type ruling engine, Geometric parameters of grooves.