

57. Голограммные дифракционные решетки в схемах малогабаритных спектрографов

Н. К. Павлычева¹, Р. Р. Ахметгалиева¹, Э. Р. Муслимов^{1,2}

¹ Казанский национальный исследовательский технический университет имени А. Н. Туполева — КАИ, Казань, Россия

² Aix Marseille Univ, CNRS, LAM, Laboratoire d'Astrophysique de Marseille, Marseille, France

В докладе рассмотрены технологические возможности изготовления голограммных решеток для малогабаритных спектральных приборов — спектрографа на основе вогнутой голограммной дифракционной решетки с коррекцией меридиональной комы в двух точках спектрограммы и спектрографа на основе вогнутой голограммной решетки и проекционного зеркала.

Ключевые слова: Спектрограф, Вогнутая голограммная дифракционная решетка, Аберрационная функция, Параметры записи.

Цитирование: Павлычева, Н. К. Голограммные дифракционные решетки в схемах малогабаритных спектрографов / Н. К. Павлычева, Р. Р. Ахметгалиева, Э. Р. Муслимов // HOLOEXPO 2018 : XV международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. — С. 236–238.

Введение

Голограммные дифракционные решетки, благодаря своим уникальным свойствам: низкому уровню рассеянного света, однородности характеристик по поверхности, возможности записи на поверхности любой формы и размера практически вытеснили традиционные нарезные дифракционные решетки.

Интерес к спектрографам предопределило использование в качестве приемников излучения диодных линеек, позволяющих регистрировать одновременно достаточно широкий спектральный диапазон. Совершенствование многоканальных фотоэлектрических приемников излучения вызвало устойчивую тенденцию к разработке малогабаритных спектральных приборов. Нами предложены оптические схемы спектрографов, предназначенных для мониторинга гидротехнических сооружений, — спектрографа на основе голограммной дифракционной решетки с коррекцией меридиональной комы в двух точках спектрограммы и спектрографа на основе вогнутой голограммной решетки и проекционного зеркала. Однако схемы записи вогнутых дифракционных решеток с малыми радиусами кривизны часто бывают трудно реализуемы из-за малых расстояний от источников голографирования до подложки. Ниже рассмотрены технологические возможности изготовления голограммных решеток для предложенных схем.

Вогнутая голограммная решетка с коррекцией меридиональной комы в двух точках спектрограммы

Спектрограф на основе голограммной дифракционной решетки с коррекцией меридиональной комы в двух точках спектрограммы имеет следующие характеристики [1]: спектральный диапазон 250–900 нм, радиус кривизны решетки $r = 100$ мм, угол падения лучей из центра входной щели в вершину решетки — 2° , число штрихов в вершине решетки $N = 370$ штр./мм, расстояние от центра входной щели до вершины решетки $d = 90,995$ мм, расстояние от вершины решетки до места фокусировки средней длины волны

$d' = 112,9$ мм, световой диаметр решетки 30 мм, длина спектра 28 мм. Параметры записи дифракционной решетки: $d_1 = 254,861$ мм, $d_2 = 217,306$ мм, $i_1 = 33^\circ 34'$, $i_2 = 22^\circ 55'$, длина волны записи 441,6 нм.

Методика расчета оптической схемы малогабаритного спектрографа с вогнутой голограммной дифракционной решеткой, которая обеспечивает коррекцию меридиональной комы в двух точках спектрограммы, основана на минимизации определенных членов аберрационной (характеристической) функции вогнутой голограммной дифракционной решетки [2].

$$V(y, z) = -yF_0 + \frac{y^2}{2r}F_1 + \frac{z^2}{2r}F_2 + \frac{y^3}{2r^2}F_3 + \dots \quad (1)$$

С помощью аберрационной функции можно оценить допуски на параметры записи решетки. Составляющие аберраций дифракционной решетки в направлении дисперсии $\delta y'$ и в направлении высоты щели $\delta z'$ находят из соотношений:

$$\begin{aligned} \delta y' &= \frac{d'}{\cos \varphi'} \frac{\partial V}{\partial y}, \\ \delta z' &= d' \frac{\partial V}{\partial z}. \end{aligned} \quad (2)$$

Формулы (2) справедливы лишь в случаях малых аберраций и становятся непригодными, если характеризующая астигматизм величина 1-го порядка $\delta z'$ оказывается величиной того же порядка, что и длина штрихов решетки. В схеме рассматриваемого спектрографа для длины волны 575 нм (в центре спектрального диапазона) $\delta z'$ составляет 0,139 мм при длине штрихов 30 мм, что позволяет оценивать аберрации дифракционной решетки, используя соотношения (2). Влияние изменения параметров на аберрации решетки можно выразить следующим образом.

$$\begin{aligned} \Delta \delta y' &= (d' / \cos \varphi') \cdot \delta \Delta V / \delta y, \\ \Delta \delta z' &= d \delta \Delta V / \delta z. \end{aligned} \quad (3)$$

Определим влияние изменения параметров записи на изменение аберрационной функции. К пара-

метрам записи относятся: d_1 и d_2 — расстояния от источников голографирования до вершины решетки, i_1 и i_2 — углы падения лучей из источников голографирования в вершину решетки, а также длина волны записи λ_0 . Считая λ_0 постоянной величиной, имеем четыре переменных параметра, изменение которых вызывает следующее изменение абберационной функции

$$\Delta V = \Delta i_1 \partial V / \partial i_1 + \Delta i_2 \partial V / \partial i_2 + \Delta d_1 \partial V / \partial d_1 + \Delta d_2 \partial V / \partial d_2. \quad (4)$$

Допустим, что сумма влияний изменения параметров не превышает допустимое отклонение $\Delta \delta y'_{\text{сум}}$ при выполнении следующего условия

$$(\Delta \delta y' / \delta \alpha_i) \Delta \alpha_i = \Delta \delta y'_{\text{сум}} / \sqrt{4}. \quad (5)$$

Ограничимся при нахождении ΔV только коэффициентом F_1 , характеризующим максимальную по величине абберацию — дефокусировку. Получаем следующие соотношения для определения допусков на параметры голографирования:

$$d' y \lambda \cos^2 i_1 \Delta d_1 / \cos \phi' \lambda_0 d_1^2 = \Delta \delta y'_{\text{сум}} / 2, \quad (6)$$

$$d' y \lambda \cos^2 i_2 \Delta d_2 / \cos \phi' \lambda_0 d_2^2 = \Delta \delta y'_{\text{сум}} / 2, \quad (7)$$

$$d' y \lambda (\sin i_1 / r - \sin 2i_1 / d_1) \Delta i_1 / \cos \phi' \lambda_0 = \Delta \delta y'_{\text{сум}} / 2, \quad (8)$$

$$d' y \lambda (\sin i_2 / r - \sin 2i_2 / d_2) \Delta i_2 / \cos \phi' \lambda_0 = \Delta \delta y'_{\text{сум}} / 2, \quad (9)$$

где y — высота луча на поверхности дифракционной решетки, λ — длина волны в центре спектрального диапазона, r — радиус кривизны дифракционной решетки, ϕ' — угол дифракции луча длины волны λ , дифрагированного в вершине решетки.

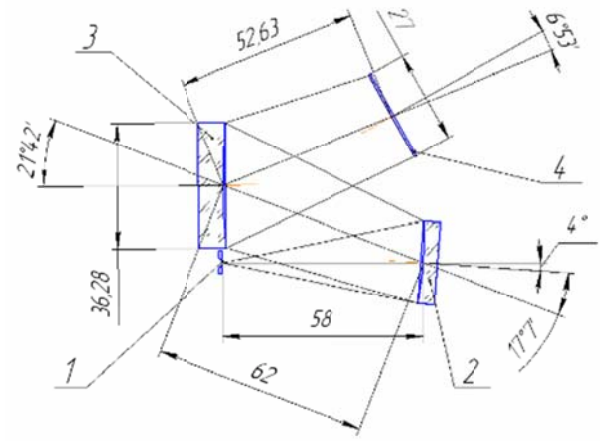
Возможны два варианта спектрографов — с плоской поверхностью регистрации спектра и с цилиндрической поверхностью регистрации (радиус цилиндрической поверхности 64 мм). В варианте с плоской поверхностью регистрации спектра ширина аппаратной функции, определяющая предел разрешения спектрографа, для центра поля равна 0,1 мм. Полагая, что допустимое отклонение $\Delta \delta y'_{\text{сум}}$ не превышает 10 % ширины аппаратной функции, получаем из соотношений (6)–(9) следующие допуски на параметры записи: $\Delta d_1 = 0,205$ мм, $\Delta d_2 = 0,122$ мм, $\Delta i_1 = 4'$, $\Delta i_2 = 13'$. Допуск на величину i_2 , определенный из (9) оказался очень широким. В тоже время большое отклонение значения i_2 от расчетного приводит к изменению числа штрихов N . Частота штрихов задается, исходя из требований к дисперсии прибора, и связана с углами голографирования соотношением

$$1/N = \lambda_0 / (\sin i_1 - \sin i_2). \quad (10)$$

Поэтому сводка формул (6)–(9) должна быть дополнена требованием к установке углов голографирования, получаемым после дифференцирования (10) в предположении, что угол i_1 имеет фиксированное значение.

$$\cos i_2 \Delta i_2 = \lambda_0 \Delta N. \quad (11)$$

Полагая допустимым изменение ΔN на 1 штр./мм, имеем из соотношения (11) $\Delta i_2 = 1'40''$. Полученные



1 — входная щель, 2 — голографическая дифракционная решетка, 3 — вогнутое зеркало, 4 — плоскость фотоприемника
Рис. 1. Оптическая схема S-образного спектрографа

значения даже шире стандартных допусков: 0,05 мм на расстояния от источников голографирования до вершины подложки и $1'$ на значения углов.

В спектрографе с цилиндрической поверхностью регистрации предел разрешения равен 0,01 мм, соответственно 10 % от этой величины — 0,001 мм. С допустимым отклонением $\Delta \delta y'_{\text{сум}} = 0,001$ мм имеем из соотношений (5)–(8): $\Delta d_1 = 0,020$ мм, $\Delta d_2 = 0,012$ мм, $\Delta i_1 = 24''$, $\Delta i_2 = 1'16''$. Следовательно, для реализации высокого разрешения следует на порядок ужесточить требования к параметрам записи.

Спектрограф на основе вогнутой голограммной решетки и проекционного зеркала

Одним из путей увеличения числа свободных коррекционных параметров в схемах спектрографов является введение дополнительных оптических компонентов. Примером может служить компактная оптическая схема спектрографа с голограммной дифракционной решеткой с коррекцией аббераций и вогнутым зеркалом [3]. Поскольку при наличии двух отражательных элементов рабочие пучки лучей дважды меняют направление распространения, будем называть такую конфигурацию S-образной (рис. 1).

За счет использования двух отражений и большего числа свободных коррекционных параметров в подобной схеме удастся достичь высокой светосилы и относительно высокого качества изображения при минимальных габаритах. Для расчета оптической схемы нами была использована стандартная процедура автоматизированной оптимизации оптических систем, реализованная в ППП Zemax. В качестве стартовой точки оптимизационного процесса использовалась схема спектрографа с плоским полем с голограммной дифракционной решеткой. S-образная оптическая схема компактного спектрографа имеет следующие параметры: рабочий спектральный диапазон 200–1000 нм, длина схемы 58 мм, относительное отверстие 1:2,4 (отношение расстояния от входной щели до решетки к ее диаметру), обратная линейная дисперсия 31 нм/мм, длина спектра 27,9 мм, радиус кривизны поверхности

дифракционной решетки 88,441 мм, частота штрихов в вершине 397,2 штр./мм, радиус кривизны зеркала 236,136 мм. Параметры записи дифракционной решетки: $d_1 = 199,998$ мм, $d_2 = 209,376$ мм, $i_1 = 35^\circ 37' 33''$, $i_2 = 22^\circ 39' 46''$, длина волны записи 441,6 нм.

Расчет допусков также проводим с помощью программы Zemax. В Zemax обратная задача расчета допусков по заданному критерию качества решается итерационным способом. Параметрам системы придаются малые отклонения в заданном интервале, контролируемый критерий вычисляется до совпадения с заданным пределом. При этом допуск на каждый параметр рассчитывается изолированно. Будем считать допустимым 10 %-ное увеличение среднеквадратического значения поперечного размера пятна рассеяния $\Delta Y'$.

Расчет проводился отдельно для трех контрольных длин волн в центре и на краях рабочего спектрального диапазона, затем выбиралось наименьшее допустимое отклонение, в предположении, что все элементы схемы неподвижны, т. е. возможность юстировки отсутствует (как правило, именно такую конструкцию имеют компактные спектрометры). Результаты расчета допусков на параметры записи решетки приведены в табл. 1. Результирующие допуски выделены жирным шрифтом.

Табл. 1. Допуски на параметры записи дифракционной решетки S-образного спектрографа

Параметр	$\lambda = 600$ нм	$\lambda = 200$ нм	$\lambda = 1000$ нм
	$\Delta Y' = 0,012$ мм	$\Delta Y' = 0,010$ мм	$\Delta Y' = 0,014$ мм
Δi_1	3,3'	38,5'	13,6'
Δi_2	27,4'	33,3'	18,9'
Δd_1 , мм	0,100	1,280	0,413
Δd_2 , мм	0,286	0,963	0,417

Из таблицы видно, что допуски на линейные координаты источников достаточно свободные и не превосходят технологического предела. Допуски на угловые величины также далеки от предела, определяемого измерительными средствами.

Заключение

Таким образом, приведенные расчеты показали, что схемы записи дифракционных решеток для малогабаритных спектрографов могут быть собраны и реализованы в рамках существующей технологии. Исключение составляет схема записи дифракционной решетки для спектрографа, имеющего приемник излучения с цилиндрической поверхностью. В настоящее время такие приемники широко не используются, однако их появление говорит о необходимости дальнейшего совершенствования технологии производства голограммных дифракционных решеток.

Список источников

- [1] Павлычева, Н. К. Исследование коррекционных возможностей вогнутой голограммной дифракционной решетки в схеме малогабаритного спектрофлуориметра / Н. К. Павлычева, Р. Р. Ахметгалеева // Голография. Наука и практика: XIV международная конференция HOLOEXPO 2017, 12–14 сентября 2017 г., г. Звенигород, Россия: Тезисы докладов. — Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2017. — С. 154–157.
- [2] Павлычева, Н. К. Спектральные приборы с неклассическими дифракционными решетками / Н. К. Павлычева. — Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2003. — 198 с.
- [3] Ахметгалеева, Р. Р. Расчёт компактных S-образных оптических схем спектрографов / Р. Р. Ахметгалеева, Э. Р. Муслимов, Н. К. Павлычева // Оптический журнал. — 2016. — Том 83. — № 8. — С. 32–40.

Holographic diffraction gratings in the schemes of small-size spectrographs

N. K. Pavlycheva¹, R. R. Akhmetgaleeva¹, E. R. Muslimov^{1,2}

¹ Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev — KAI, Kazan, Russia

² Aix Marseille Univ, CNRS, LAM, Laboratoire d'Astrophysique de Marseille, Marseille, France

The use of diode arrays, capable of recording at the same time a sufficiently wide spectral range, as radiation detectors in spectral instruments predetermined interest in optical schemes of small spectrographs. We propose optical schemes for spectrographs intended for monitoring hydraulic structures: a spectrograph based on a concave holographic diffraction grating with correction of the meridional coma at two points of the spectrogram and a spectrograph based on a concave holographic diffraction grating and a projection mirror. The recording schemes of concave diffraction gratings with small radii of curvature are often difficult to realize because of small distances from the sources of holography to the substrate.

Keywords: Spectrograph, Concave hologram diffraction grating, Aberration function, Recording parameters.