

УДК 681.7.063; 681.785.55

ПОЛУЧЕНИЕ ГОЛОГРАММНЫХ ДИФРАКЦИОННЫХ РЕШЕТОК В НЕГОМОЦЕНТРИЧЕСКИХ ПУЧКАХ

© 2007 г. А. А. Белокопытов*, Н. К. Павлычева**, доктор техн. наук;
В. А. Селезнев *, канд. физ.-мат. наук

* НПО "Государственный институт прикладной оптики", г. Казань

E-mail: nrogipro@tnpko.ru

** Казанский государственный технический университет им. А.Н. Туполева, г. Казань

Представлена методика расчета оптических схем спектральных приборов с неклассическими вогнутыми голограммными дифракционными решетками (ВГДР). Даны формулы расчета допусков на точность установки параметров голографирования. Описана голографическая установка для регистрации ВГДР в негомоцентрических пучках. Проведен абберационный расчет спектрографа с ВГДР для различных схем записи решетки. Показано, что метод записи решеток в негомоцентрических пучках позволяет существенно улучшить абберационные и энергетические характеристики спектрографа.

Коды OCIS: 050.1950, 090.1000.

Поступила в редакцию 08.09.2006.

Методика расчета голограммных решеток с коррекцией аббераций

В оптических схемах вновь разрабатываемых спектральных приборов в основном используются вогнутые голограммные дифракционные решетки (ВГДР) с коррекцией аббераций. Такие схемы позволяют создавать компактные приборы, сочетающие минимальное количество оптических деталей с высоким качеством спектра.

Абберационные характеристики ВГДР удобно исследовать с помощью абберационной (характеристической) функции [1]

$$V(y, z) = -yF_0 + (y^2/2r)F_1 + (z^2/2r)F_2 + (y^3/2r^2)F_3 + (yz^2/2r^2)F_4 + (y^4/8r^3)F_5 + (y^2z^2/4r^3)F_6 + (z^4/8r^3)F_7.$$

Коэффициент F_1 характеризует фокусировку лучей в меридиональной плоскости, F_2 – в сагиттальной, F_3 характеризует меридиональную кому, F_4 – сагиттальную, коэффициенты F_5, F_6, F_7 характеризуют абберации 3-го порядка. Равенство $F_i = 0$ является условием коррекции абберации, характеризуемой i -м коэффициентом. Коэффициенты F_i имеют вид:

$$F_i = M_i - k\lambda H_i / \lambda_0,$$

где M_i содержат параметры схемы, H_i содержат параметры голографирования, λ_0 – длина волны записи.

ВГДР получают путем регистрации на светочувствительном материале интерференционной картины, образованной двумя когерентными пучками света (рис. 1).

Значения коэффициентов H_i определяются положением источников излучения относительно заготовки и длиной волны записи λ_0 . Параметрами голографирования, или параметрами записи, называют расстояния от источников O_1 и O_2 до вершины решетки O , обозначаемые d_1 и d_2 , и углы падения лучей из источников в вершину решетки i_1 и i_2 . Частота штрихов N связана с углами голографирования соотношением $1/N = \lambda_0 / (\sin i_1 - \sin i_2)$.

Выбор длины волны излучения лазера λ_0 в значительной степени ограничен. Частота штрихов определяется из требований к дисперсии прибора,

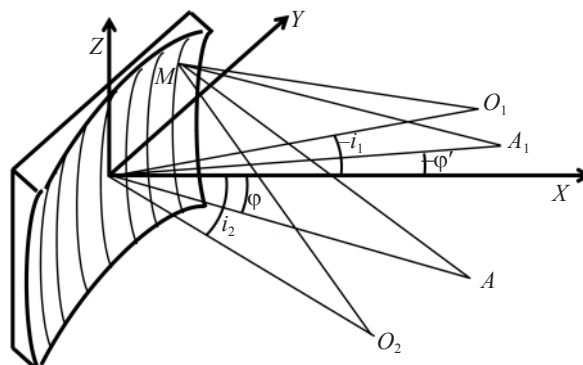


Рис. 1. Вогнутая голограммная дифракционная решетка. Пояснения см. в тексте.

поэтому имеем три независимых параметра, что дает возможность исправить соответствующим выбором этих параметров три вида aberrаций.

С увеличением светосилы прибора возрастает роль неучтенных aberrаций, особенно сагиттальной комы. Исправить сагиттальную кому и сферическую aberrацию 3-го порядка позволяет запись решетки в негомоцентрических (астигматических) пучках [1, 2].

В этом случае четыре параметра определяют положение источников в меридиональной плоскости: расстояния от вершины подложки до источников записи d_1, d_2 и углы падения лучей от источников записи в вершину подложки i_1, i_2 . Два дополнительных параметра d_{1S} и d_{2S} определяют положение источников записи в сагиттальной плоскости. Параметры записи d_1, d_2, i_1, i_2 определяются из условий минимизации в плоскости спектра дефокусировки, меридиональной комы и сферической aberrации 3-го порядка, а параметры d_{1S} и d_{2S} – из условий минимизации в плоскости спектра астигматизма и сагиттальной комы.

Необходимая негомоцентричность пучка может быть получена, например, использованием наклонного падения лучей на сферическое зеркало или применением при записи цилиндрической оптики – цилиндрических зеркал или линз. Для дифракционных решеток, записанных при помощи сферических зеркал, предложен термин “голограммные дифракционные решетки 2-го поколения” [3].

Рассмотрим в качестве примера дифракционную решетку для спектрографа на круге Роуланда, име-

ющего следующие характеристики: радиус кривизны дифракционной решетки 750 мм, частота штрихов 3600 штр/мм, угол падения лучей на решетку $50^{\circ}36'17''$, рабочий спектральный диапазон 208,8–350 нм, размер заштрихованной поверхности 50×50 мм. Aberrации спектрографа с классической дифракционной решеткой приведены в табл. 1, при этом использованы следующие обозначения: y, z – координаты луча на поверхности дифракционной решетки; $\delta y', \delta z'$ – aberrации в плоскости фокусировки спектра.

Для уменьшения aberrаций заштрихованная поверхность вогнутых классических решеток обычно диафрагмируется по высоте штриха, что приводит к значительным энергетическим потерям. Коррекция астигматизма особенно актуальна при установке вместо фотоэлектронных умножителей (ФЭУ) систем регистрации на основе диодных линеек из-за небольшой высоты их приемных площадок.

При записи решетки в гомоцентрических пучках (точечными источниками) спектрограф имеет aberrации, приведенные в табл. 2.

Для центра спектрального диапазона астигматизм исправлен практически полностью, на краях диапазона его величина значительно меньше, чем у классической дифракционной решетки. Однако величина сагиттальной комы является совершенно недопустимой.

Использование метода записи решеток в негомоцентрических пучках позволяет существенно улучшить aberrационные характеристики спектро-

Таблица 1. Aberrации дифракционной решетки на круге Роуланда

y	z	208,8 нм		250 нм		279,4 нм		350 нм	
		$\delta y'$	$\delta z'$	$\delta y'$	$\delta z'$	$\delta y'$	$\delta z'$	$\delta y'$	$\delta z'$
25		0,012		0,014		0,015		0,017	
12,5		0,002		0,002		0,002		0,002	
-12,5		-0,001		-0,002		-0,002		-0,002	
-25		-0,011		-0,013		-0,014		-0,016	
0	12,5	0,193	11,761	0,168	11,865	0,145	12,113	0,057	13,234
0	25	0,771	23,499	0,672	23,706	0,578	24,202	0,0228	26,439

Таблица 2. Aberrации голограммной решетки, записанные точечными источниками

y	z	208,8 нм		250 нм		279,4 нм		350 нм	
		$\delta y'$	$\delta z'$	$\delta y'$	$\delta z'$	$\delta y'$	$\delta z'$	$\delta y'$	$\delta z'$
25		-0,003		0,001		-0,002		-0,004	
12,5		0		0		0		0	
-12,5		0		0		0		0	
-25		0		-0,002		-0,001		0	
0	12,5	-0,286	-0,876	-0,156	1,783	-0,238	0,011	-0,347	-1,382
0	25	-1,142	-1,728	-0,621	3,594	-0,947	0,050	-1,384	-2,762

Таблица 3. Аберрации решетки, записанной в негомоцентрических пучках

y	z	208,8 нм		250 нм		279,4 нм		350 нм	
		$\delta y'$	$\delta z'$	$\delta y'$	$\delta z'$	$\delta y'$	$\delta z'$	$\delta y'$	$\delta z'$
25		-0,008		-0,013		-0,16		-0,021	
12,5		-0,002		-0,003		-0,002		-0,004	
-12,5		-0,003		-0,003		-0,003		-0,004	
-25		-0,012		-0,014		-0,014		-0,017	
0	12,5	0,020	1,781	0,001	0,009	-0,007	-0,878	-0,015	-1,379
0	25	0,080	3,567	0,003	0,027	-0,032	-1,744	-0,061	-2,747

графа. Степень коррекции астигматизма в этом случае такая же, как у голограммной решетки, записанной точечными источниками, а величина сагиттальной комы на порядок меньше. Аберрации спектрографа приведены в табл. 3.

Как видно из таблицы, применение голограммной дифракционной решетки, записанной в негомоцентрических пучках, позволяет существенно улучшить энергетические характеристики спектрографа без ухудшения его разрешающей способности.

Допуски на параметры записи Δd_1 , Δd_2 , Δi_1 , Δi_2 в меридиональной плоскости определяются из следующих соотношений [1]:

$$d' y k \lambda \Delta d_1 \cos^2 i_1 / \lambda_0 d_1^2 \cos \varphi' = \Delta \delta y'_c / 2, \quad (1)$$

$$d' y k \lambda \Delta d_2 \cos^2 i_2 / \lambda_0 d_2^2 \cos \varphi' = \Delta \delta y'_c / 2, \quad (2)$$

$$d' y k \lambda \Delta i_1 (\sin i_1 / r - \sin 2i_1 / d_1) / \lambda_0 \cos \varphi' = \Delta \delta y'_c / 2, \quad (3)$$

$$d' y k \lambda \Delta i_2 (\sin i_2 / r - \sin 2i_2 / d_2) / \lambda_0 \cos \varphi' = \Delta \delta y'_c / 2, \quad (4)$$

где d' – расстояние от вершины решетки до точки фокусировки лучей длины волны λ , φ' – угол дифракции лучей длины волны λ , y – координата луча на поверхности решетки в меридиональной плоскости, $\Delta \delta'_c$ – допустимое отклонение суммарной аберрации.

Расчеты показали, что допуск на величину i_2 , определенный из формулы (4), при небольших значениях этого угла получается очень широким. В то же время большое отклонение значения i_2 от расчетного приводит к изменению числа штрихов N . Для этих случаев формулы (1–4) должны быть дополнены соотношением $\cos i_2 \Delta i_2 = k \lambda_0 \Delta N$.

Изменение величины сагиттальной комы из-за изменения расстояний до источников голографирования в сагиттальной плоскости Δd_{1s} и Δd_{2s} определяется следующим образом:

$$\begin{aligned} \Delta \delta y'_k / 1,41 = \\ = d' z^2 \sin i_1 k \lambda \Delta d_{1s} (1/d_{1s} - \cos i_1 / 2r) / \cos \varphi' d_{1s}^2 \lambda_0, \end{aligned}$$

$$\Delta \delta y'_k / 1,41 =$$

$$= d' z^2 \sin i_2 k \lambda \Delta d_{2s} (1/d_{2s} - \cos i_2 / 2r) / \cos \varphi' d_{2s}^2 \lambda_0.$$

Для определения допусков на величины расстояний d_{1s} и d_{2s} необходимо также учитывать их влияние на астигматизм 1-го порядка

$$\Delta z' / 1,41 = d' z k \lambda \Delta d_{1s} / d_{1s}^2 \lambda_0,$$

$$\Delta z' / 1,41 = d' z k \lambda \Delta d_{2s} / d_{2s}^2 \lambda_0,$$

где z – координата луча на поверхности решетки в сагиттальной плоскости.

Описание голографической установки

В ГИПО создана универсальная голографическая установка, позволяющая записывать голограммные дифракционные решетки в негомоцентрических пучках. Установка представляет собой виброзащищенную плиту с размещенными на ней узлами крепления оптических элементов и юстировочными механизмами: делительным столом с установленным на нем узлом крепления подложки, поворотными зеркалами, светоделителем и двумя узлами крепления микрообъективов и точечных диафрагм. Оптическая схема установки представлена на рис. 2.

Принцип работы установки следующий. Лазерный пучок отражается поворотным зеркалом 1 (с угловой подвижкой) и падает на светоделительный кубик 5 (с угловой подвижкой). Часть светового потока проходит сквозь светоделитель, микрообъектив 7 и точечную диафрагму 9, затем отражается зеркалом 11 в направлении подложки 12. Другая часть отражается от светоделителя, затем последовательно отражается поворотными зеркалами 2, 3 и 4, проходит сквозь микрообъектив 6 и точечную диафрагму 8, отражается зеркалом 10 и только потом падает на подложку 12. Интерференция двух пучков регистрируется в светочувствительном слое подложки. Как известно, максимальный контраст интерференционной картины достигается при

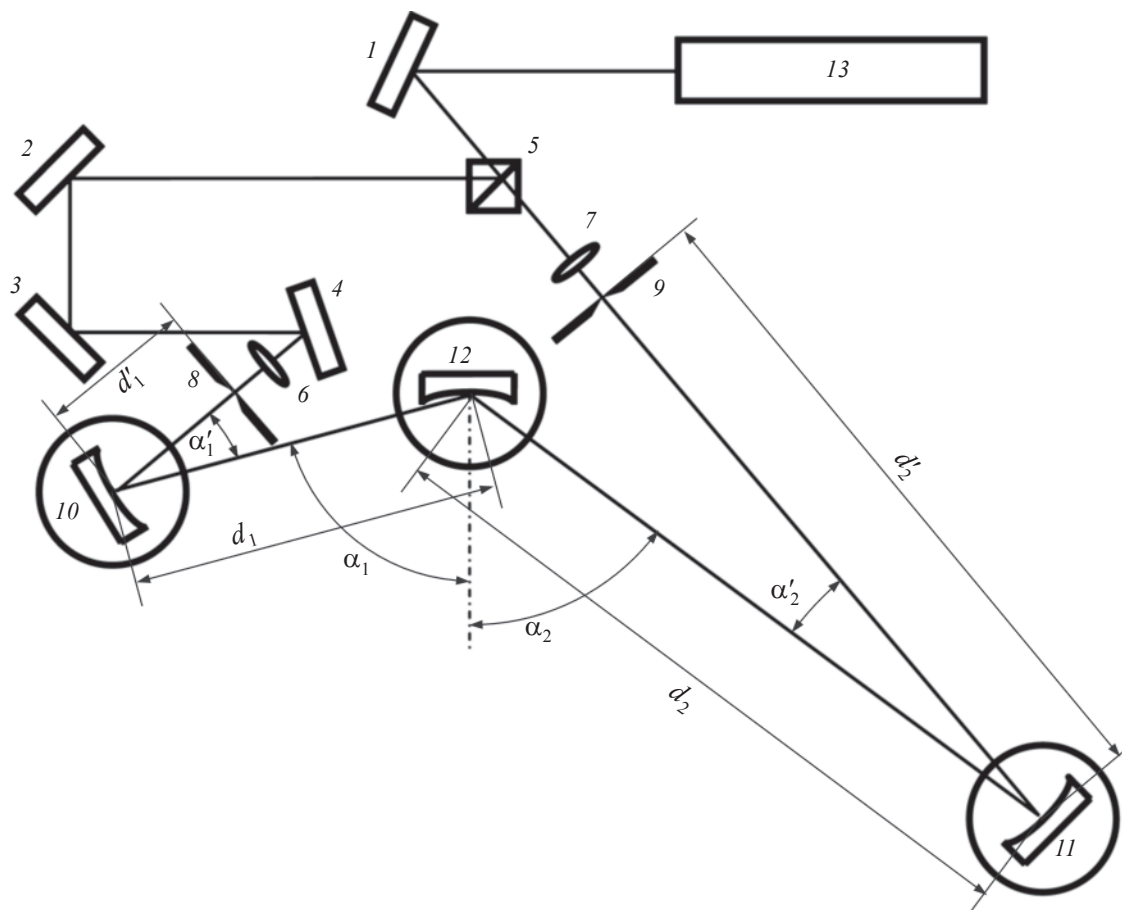


Рис. 2. Оптическая схема установки для получения голограммных дифракционных решеток в негомоцентрических пучках: 1, 2, 3, 4 – поворотные зеркала; 5 – светоделительный кубик; 6, 7 – микрообъективы; 8, 9 – точечные диафрагмы; 10, 11 – формирующие зеркала; 12 – делительный стол с узлом крепления подложки; 13 – He–Cd-лазер.

равенстве интенсивностей интерферирующих пучков. Выполнение этого условия обеспечивается соответствующим подбором фокусных расстояний микрообъективов 6, 7 и юстировкой точечных диафрагм 8, 9.

Зеркала 2, 3, 4 представляют собой оптическую линию задержки, необходимую для выполнения условия равенства оптических путей в интерферирующих пучках. Допуск на точность установки оптических путей определяется длиной когерентности излучения и может варьироваться в зависимости от модели используемого лазера.

Микрообъективы 6, 7 и точечные диафрагмы 8, 9 служат для получения расходящихся пучков. Конструктивно крепления микрообъектива и точечной диафрагмы выполнены в виде единого узла, в котором помимо подвижек, отвечающих за установку этих деталей на оптическую ось схемы, предусмотрена возможность точной установки диафрагмы в фокус объектива и быстрой замены любого из элементов в случае необходимости. Диаметры точечных диафрагм составляют примерно 10–15 мкм.

Фокусные расстояния микрообъективов лежат в пределах от 3 до 30 мм.

Зеркала 10 и 11 в совокупности с точечными диафрагмами 8 и 9 формируют волновые фронты интерферирующих пучков и определяют частотную и абберационную характеристики записываемой дифракционной решетки. В зависимости от расчета в эти узлы могут быть установлены плоские, сферические или асферические зеркала. На практике для получения негомоцентричности обычно используются цилиндрические зеркала. Их применение обусловлено относительной простотой юстировки схемы, позволяющей проводить установку параметров голографирования с максимальной точностью и требованиями к универсальности голографической установки. Узлы крепления зеркал 10, 11 расположены на двух рельсах. Рельсы одним концом крепятся на оси вращения делительного стола. Конструкция крепления позволяет поворачивать рельсы независимо друг от друга относительно оси вращения делительного стола в горизонтальной плоскости и устанавливать углы голографирования в пре-

делах от 10° до 80° . Длина рельса позволяет устанавливать расстояния d_1, d_2 в пределах от 300 до 1500 мм. Точная юстировка зеркал *10, 11* выполняется с помощью двух угловых и трех координатных подвижек. Поворот зеркал вокруг вертикальной оси отсчитывается по измерительному лимбу с ценой деления $20'$.

На делительном столе установлен узел крепления подложки. Стол обеспечивает точность установки углов $\pm 3''$. Узел крепления заготовки позволяет использовать плоские, сферические и асферические подложки диаметром до 70 мм. Установка центра подложки на ось вращения делительного стола осуществляется двумя горизонтальными линейными подвижками, перемещающими заготовку в перпендикулярных направлениях. Применение этих подвижек позволяет регистрировать решетки на подложках с различными стрелками прогиба. Установка центра подложки в плоскости распространения лучей проводится вертикальным перемещением делительного стола, а установка подложки в положение, перпендикулярное плоскости распространения лучей, – угловой подвижкой узла крепления заготовки.

Заключение

Описанная голографическая установка позволяет получать вогнутые голограммные дифракционные решетки с частотой штрихов от 300 до 3600 штр/мм и диаметром до 70 мм. Применение метода записи в негомоцентрических пучках обеспечивает существенное снижение аберраций решетки и повышение технических характеристик спектральных приборов на ее основе. Изготовленные ВГДР были успешно испытаны на ряде серийно выпускающихся

спектральных приборов. Так, сравнение энергетических характеристик ВГДР показало, что яркость спектра в плоскости фокусировки у решеток, полученных в негомоцентрических пучках, в 3–5 раз выше, чем у решеток, записанных с использованием точечных источников при одинаковой дифракционной эффективности.

Достоинствами установки являются универсальность, высокая виброустойчивость, относительная простота юстировки и эксплуатации. Установка может быть использована в производстве как серийных, так и уникальных голограммных дифракционных решеток.

В настоящее время в ГИПО ведется активная работа по созданию измерительного стенда для технологического контроля параметров вогнутых голограммных дифракционных решеток, основанного на использовании фотоэлектрической регистрации (фотодиодных линеек). Ввод в эксплуатацию этого стенда позволит оперативно измерять дифракционную эффективность на любой стадии технологического процесса и существенно облегчит получение решеток с заданными техническими характеристиками.

ЛИТЕРАТУРА

1. Павлычева Н.К. Спектральные приборы с неклассическими дифракционными решетками. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2003. 197 с.
2. Павлычева Н.К. Голограммные дифракционные решетки 2-го и 3-го поколений в схеме спектрографа Роуланда // Оптический журнал. 2002. Т. 69. № 4. С. 69–74.
3. Palmer C. Theory of second-generation holographic diffraction gratings // JOSA. 1989. V. A6. № 8. P. 1175–1178.