

48. Расчет двумерной дифракционной решетки в спектрометре скрещенной дисперсии

Ю. В. Бажанов

АО «НПК «Системы прецизионного приборостроения», Москва, Россия

Спектрометры, основанные на линейных датчиках, имеют ряд недостатков. Во-первых, получение высокого разрешения для широкополосного спектрального изображения приводит к необходимости использования нескольких (от 10–15) датчиков. Во-вторых, на границах спектральной области эффективность дифракционной решетки невысока. В-третьих, изображение высших порядков накладываются на низшие. Как известно, наложение спектров различных порядков дифракционной решетки может быть устранено с помощью спектральных фильтров, однако, возможности этих методов ограничены. Существует еще один способ разделения порядков спектра-метод «скрещенной дисперсии», который заключается в использовании дополнительной дифракционной решетки или спектральной призмы, имеющей направление дисперсии перпендикулярно направлению первичной решетки. Пересечение дисперсий позволяет регистрировать спектры различных порядков в широкой спектральной области. Ступенчатые светоотражающие решетки с высокой частотой канавок (echelett), работающие в заказах с низким спектром или низкой частотой канавок (echelle), работающие как в высоких заказах дифракции, часто используются в качестве первичной решетки.

Цитирование: Бажанов, Ю. В. Расчет двумерной дифракционной решетки в спектрометре скрещенной дисперсии / Ю. В. Бажанов // HOLOEXPO 2018 : XV международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. — С. 204–205.

В данной статье рассматривается возможность расчета спектрального устройства, основанного на двумерной решетке типа эшелетт. Спектры высоких порядков такой решетки расположены на датчике в виде строк, однако дополнительный дисперсионный элемент отсутствует. Наиболее подходящей для этого является схема Черны-Тернера, где плоская решетка расположена между двумя вогнутыми зеркалами. Для упрощения возьмем классическую схему Черны-Тернера, где дифракционная решетка находится в параллельных пучках, а расстояние от решетки равно 0,85 второго зеркального фокуса. В этом случае спектральное изображение находится на плоскости с минимизацией поперечных аберраций.

В качестве первичной решетки мы используем плоскость решетки с частотой штрихов $N_1 = 100 \text{ мм}^{-1}$ в порядках спектра от 10 до 18, а в качестве дополнительной решетки — $N_2 = 100 \text{ мм}^{-1}$ в первом порядке спектра. Длина волны и соответствующие порядки указаны в табл. 1.

Верхняя строка таблицы-спектральный Порядковый номер, три следующие строки-длины волн. Их комплект составляет 9 конфигураций. Общей спектральной области 400–750 нм. Если порядки спектра поместить в линию, то его длина будет примерно в 9 раз больше, что затрудняет получение спектрального изображения высокого качества. Еще одним существенным преимуществом такого расположения спек-

тров является то, что все порядки спектра могут находиться в области высокой дифракционной эффективности.

Рассмотрим оптическую компоновку со следующими параметрами $r_1 = r_2 = 250 \text{ мм}$, $\alpha_1 = 5^\circ$, $\alpha_2 = 5,5^\circ$ (рис. 1). Значения $\bar{r}_1$, $\bar{r}_2$, d_1 , d_2 , a_{ij} вычисляются по формулам (см. полный текст работы). Эти значения используются в качестве исходных для оптимизации параметров оптической схемы. Расчет выполнен с использованием программного обеспечения ZEMAX [1]. Для оптимизации введено известное расширенное тороидальное уравнение решетки на зеркальных поверхностях.

$$z = \frac{cy^2}{1 - \sqrt{1 - (k+1)c^2y^2}} + \sum_{i=1}^N A_i E_i(x, y),$$

где z — стрелка прогиба, x и y — координаты поверхности, c — кривизна, a — полиномиальные коэффициенты. Очевидно, что спектральный порядок в этом случае равен нулю. В табл. 2 приведены среднеквадратические значения радиуса пятна для всех конфигураций оптической системы скрещенного дисперсионного спектрометра после оптимизации с ZEMAX.

Верхняя строка 1 таблицы-верхняя-порядки спектра (10, 14, 18), три последующие строки — значения СКО радиуса для длин волн в конфигурациях. Как видно из табл. 2, при использовании зеркал со свободной поверхностью значения среднеквадратического радиуса пятна рассеяния уменьшаются в 3–4 раза.

Табл. 1

K	18	17	16	15	14	13	12	11	10
$\lambda_{\min}$	0,395	0,417	0,441	0,469	0,500	0,556	0,577	0,625	0,682
λ_0	0,406	0,429	0,455	0,484	0,518	0,536	0,601	0,653	0,716
$\lambda_{\max}$	0,417	0,441	0,469	0,500	0,536	0,577	0,625	0,682	0,750

Табл. 2. Среднеквадратические значения радиуса пятна рассеяния в мкм

Тип	Тороидальные зеркала			Зеркала свободной формы		
K	18	14	10	18	14	10
$\lambda_{\min}$	22,5	15,3	20,0	5,1	4,3	7,1
λ_0	15,3	9,7	13,6	4,7	2,5	3,1
$\lambda_{\max}$	14,0	19,5	21,6	5,5	3,7	11,1

Расчеты проводились на основе 14 полиномиальных коэффициентов, если использовать больше, то можно уменьшить пятно абберации вдвое. Однако на практике спектральное разрешение не будет увеличиваться из-за того, что входная щель прибора имеет определенные размеры. Кроме того, изготовление таких поверхностей очень затруднено.

Использование скрещенных решеток значительно упрощает компоновку устройства и может быть особенно эффективным в УФ и ИК диапазонах, в виду небольшого количества материалов для изготовления спектральных призм. Успехи в изготовлении оптических элементов свободной формы позволяют надеяться на реализацию данной компоновки.

Список источников

- [1] ZEMAX is a trademark of Zemax Development Corporation, Bellevue, Washington 98004, USA.

Design two-dimensional diffraction grating in spectrometer crossed dispersion

Y. Bazhanov

Scientific and Production Corporation "Precision Systems and Instruments", Moscow, Russia

Spectrometers, based on linear sensors have several disadvantages. Firstly, for acquiring of high resolution for wide waveband spectral image results in need of usage of several (from 10–15) sensors. Secondly, diffractive grating efficiency is not high at the borders of spectral area. Thirdly, image of higher orders lays over lower ones. As is known, the overlay of the spectra of the various orders of a diffraction grating can be eliminated by using spectral filters, however, possibilities of these methods are limited. There is one more way to divide orders of spectrum — "crossed dispersion" method, which consists of usage of additional diffraction grating or spectral prism, which has dispersion direction perpendicular to the one of primary grating. Crossing dispersions one is possible to register different orders spectra in a wide spectral area. Stepped reflective gratings with either high groove frequency (echelett), working in low spectrum orders, or low groove frequency (echelle), working as in high diffraction orders are often used as primary grating.