

平场全息凹面光栅的设计

陈吉武

(中国计量学院几何量教研室, 杭州 310034)

林中

(浙江大学光学仪器系, 杭州 310000)

孟庆华

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 130022)

摘要 平场全息凹面光栅是一种光谱面为平面的凹面全息光栅。在像面上, 如果用某种平面多通道光电接收器探测光谱信号, 可使光谱分析简单、迅速, 并可做瞬间光谱分析。因为准直、色散和聚焦都集于一体于凹面光栅, 因而不仅光能损失大为减小, 而且整个光谱仪也变得小巧轻便。本文将全息凹面光栅的理论用于消像差平场全息凹面光栅的设计中。描述了在任意给定的仪器参数下, 确定光栅表面的曲率半径和记录参数的方法。并通过光线追迹, 用谱线在点列阵图上的扩散度, 即相应的相对强度分布轮廓曲线来评价所设计的光栅, 结果是令人满意的。

关键词: 全息; 凹面光栅

1 前 言

到目前为止, 全息凹面光栅已经发展到第四代了, 即所谓IV型凹面光栅。根据一种分类方法, IV型凹面光栅主要有三种: 其一为可以象平面光栅一样绕简单转轴旋转以进行光谱扫描的凹面光栅, 并且具有较为理想的像质。这类光栅已应用于多种规模的近紫外到近红外的单色仪中; 其二为非球面光栅, 这类光栅应用于远紫外区分析工作的掠入射系统和 Seya-Namiooka 单色仪中是有很有效的, 已经研制成功了超环面、椭球面和具有一个对称平面的表面等类型的非球面光栅; 其三为平场凹面光栅, 这种光栅可用光电二极管列阵, 多通道光电板或摄象管等作平谱面记录, 这样可使光谱分析大大简化, 可一次性将整个波段的光谱信号全部接收, 并迅速取得分析结果, 因而有可能进行瞬态光谱分析。这种光栅已由法国的 Jobin-Yvon 公司在八十年

代初研制出来,在我国虽有此种产品,但像质不甚理想。这里我们主要讨论平场全息凹面光栅的设计,并通过点列图分析所设计的光栅性能。

2 凹面全息光栅的基本方程

参看图1,定义一个直角坐标系。设原点在凹面光栅的顶点 O 处;令 x 轴为 O 点的光栅法线;并且令 xy 平面为光栅表面的对称平面。 $A(x, y, z)$ 点是入射狭缝上的自发光点, $P(\xi, \omega, \upsilon)$ 点是光栅表面上的一点, $B(x', y', z')$ 点是从 P 点衍射的波长为 λ 的第 m 级衍射光线上的一点。

图1中对光线 APB ,光程函数 F 是由参考文献[2]的方和(7)给出:

$$\begin{aligned}
 F = & r + r' + \omega \cdot F_{100} + \frac{1}{2} \omega^2 F_{200} + \frac{1}{2} \upsilon^2 F_{020} + \omega \cdot z \cdot F_{011} + \\
 & \frac{1}{2} z^2 F_{002} + \frac{1}{2} \omega^3 F_{300} + \frac{1}{2} \omega \cdot \upsilon^2 F_{120} + \omega \cdot \omega \cdot z \cdot F_{111} + \\
 & \frac{1}{2} \omega \cdot z^2 F_{102} + \frac{1}{8} \omega^4 F_{400} + \frac{1}{8} \upsilon^4 F_{040} + \frac{1}{4} \omega^2 \upsilon^2 F_{220} + \\
 & \frac{1}{4} \omega^2 z^2 F_{202} + \frac{1}{2} \upsilon^3 z \cdot F_{031} + \frac{1}{4} \upsilon^2 z^2 F_{022} + \\
 & \frac{1}{2} \omega \cdot z^3 F_{013} + \frac{1}{2} \omega^2 \omega \cdot z \cdot F_{211} + \frac{1}{8} z^4 F_{004} + O\left(\frac{\omega^5}{R^4}\right)
 \end{aligned} \quad (1)$$

这里 F_{ijk} 的下角标 i, j, k 分别表示 ω, υ, z 的指数。

F_{ijk} 由下式决定(λ_0 为记录光波长):

$$F_{ijk} = M_{ijk} + \frac{m \mathcal{H}_{ijk}}{\lambda_0} \quad (2)$$

由下式(3)~(8)给出部分 M_{ijk} 和 F_{ijk} 的明显表达式(这些表达式来自参考文献[2]中的(9)~(29)式。该文献是描述超环面的,而本文是用于球面,所以此处令 $\rho = R$,且已将(27)~(29)式直接代入相应处):

$$\left. \begin{aligned}
 M_{100} &= -\sin\alpha - \sin\beta \\
 H_{100} &= \sin\delta - \sin\gamma
 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned}
 M_{011} &= -\frac{1}{r} - \frac{1}{r'} \cdot \frac{z'}{z} \\
 H_{011} &= 0
 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

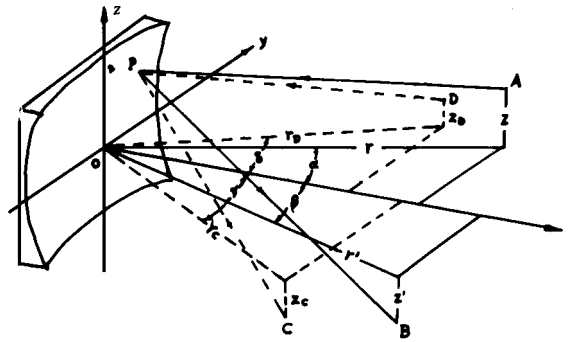


Fig 1 Schematic diagram of the optical system

$$\left. \begin{aligned} M_{200} &= \left(\frac{\cos^2 \alpha}{r} - \frac{\cos \alpha}{R} \right) + \left(\frac{\cos^2 \beta}{r'} - \frac{\cos \beta}{R} \right) \\ H_{200} &= \left(\frac{\cos^2 \gamma}{r_c} - \frac{\cos \gamma}{R} \right) + \left(\frac{\cos^2 \delta}{r_D} - \frac{\cos \delta}{R} \right) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} M_{020} &= \left(\frac{1}{r} - \frac{\cos \alpha}{R} \right) + \left(\frac{1}{r'} - \frac{\cos \beta}{R} \right) \\ H_{020} &= \left(\frac{1}{r_c} - \frac{\cos \gamma}{R} \right) + \left(\frac{1}{r_D} - \frac{\cos \delta}{R} \right) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} M_{300} &= \frac{\sin \alpha}{r} \cdot \left(\frac{\cos^2 \alpha}{r} - \frac{\cos \alpha}{R} \right) + \frac{\sin \beta}{r'} \cdot \left(\frac{\cos^2 \beta}{r'} - \frac{\cos \beta}{R} \right) \\ H_{300} &= \frac{\sin \gamma}{r_c} \cdot \left(\frac{\cos^2 \gamma}{r_c} - \frac{\cos \gamma}{R} \right) - \frac{\sin \delta}{r_D} \cdot \left(\frac{\cos^2 \delta}{r_D} - \frac{\cos \delta}{R} \right) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} M_{120} &= \frac{\sin \alpha}{r} \cdot \left(\frac{1}{r} - \frac{\cos \alpha}{R} \right) + \frac{\sin \beta}{r'} \cdot \left(\frac{1}{r'} - \frac{\cos \beta}{R} \right) \\ H_{120} &= \frac{\sin \gamma}{r_c} \cdot \left(\frac{1}{r_c} - \frac{\cos \gamma}{R} \right) - \frac{\sin \delta}{r_D} \cdot \left(\frac{1}{r_D} - \frac{\cos \delta}{R} \right) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

这里, 为了方便, 我们已假设记录点光源 C、D 都在 xy 平面内, 即 $(x_c, y_c, 0)$, $(x_D, y_D, 0)$ 。并且我们是用柱面坐标表示 M_{ijk} 和 H_{ijk} 的, 各新变量与直角坐标的关系为:

$$\left. \begin{aligned} r &= (x^2 + y^2)^{\frac{1}{2}} \\ r' &= (x'^2 + y'^2)^{\frac{1}{2}} \\ r_c &= (x_c^2 + y_c^2)^{\frac{1}{2}} \\ r_D &= (x_D^2 + y_D^2)^{\frac{1}{2}} \\ \alpha &= \sin^{-1} \left(\frac{y}{r} \right) \\ \beta &= \sin^{-1} \left(\frac{y'}{r'} \right) \\ \gamma &= \sin^{-1} \left(\frac{y_c}{r_c} \right) \\ \delta &= \sin^{-1} \left(\frac{y_D}{r_D} \right) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

显然 α β 分别为入射角和衍射角。这两角都是在 xy 平面内测得的。如果我们取关于 ω ι 的一级近似, 即:

$$F = r + r' + \omega \cdot F_{100} + \iota \cdot z \cdot F_{011} \quad (10)$$

则根据费马原理:

$$\frac{\partial F}{\partial \omega} = 0 \text{ 和 } \frac{\partial F}{\partial \iota} = 0 \quad (11)$$

我们有:

$$\sin\alpha + \sin\beta = m\lambda \cdot \frac{\sin\delta - \sin\gamma}{\lambda_0} \tag{12}$$

$$\text{和} \frac{z}{r} = - \frac{r}{r} \tag{13}$$

显然(12)式为光栅方程, 光栅常数为:

$$\sigma = \frac{\lambda_0}{\sin\delta - \sin\gamma} \tag{14}$$

(13)式为放大率.

由于(1)式中存在高次项, 因而对于任意的 P 点位置, (11)式是不能被满足的. 事实上, 脚注 $i + j + k = 2$ 的每一个 F_{ijk} 的值不为零, 都将产生一定形式的像差, 而设计全息光栅的目的正在于选择适当的 A 、 B 、 C 、 D 位置, 使这些与像差有联系的 F_{ijk} 在预定的光谱范围内达到零值或尽可能地接近零值.

3 平场凹面全息光栅的设计原理

如图2所示, 对于入射狭缝中心 $A_0(r_0, \alpha_0, 0)$, 设某一光谱象点为 $B_0(r_0, \beta_0, 0)$, 则光谱面为平面的条件为:

$$r_0 \cos(\theta - \beta_0) = k \tag{15}$$

显然式中的 θ_k 皆为常数.

我们用 \bar{F}_{ijk} 表示光线 $A_0 B_0$ 的 F_{ijk} , 则在预先给定的波段范围内 $\lambda_1 \leq \lambda \leq \lambda_2$ 或相应的衍射角度范围内 $\beta_1 \leq \beta_0 \leq \beta_2$, 需使函数 $|\bar{F}_{ijk}|$ 最小化, 以尽可能地减小像差.

$$\bar{F}_{ijk} = \bar{M}_{ijk} + \frac{m\lambda}{\lambda_0} \cdot H_{ijk} \tag{16}$$

令

$$A_{ijk} = \frac{H_{ijk}}{\sin\delta - \sin\gamma} = \frac{\sigma}{\lambda_0} \cdot H_{ijk} \quad (i + j + k = 2) \tag{17}$$

这里 σ 为光栅常数, 则

$$\bar{F}_{ijk}(r_0, \alpha_0, k, \theta, R, A_{ijk}, \beta_0) = \bar{M}_{ijk} + A_{ijk}(\sin\alpha_0 + \sin\beta_0) \tag{18}$$

最小化的目标函数应反映整个波段的成像性质, 可定义为:

$$I_{ijk} = \int_{\beta_1}^{\beta_2} \bar{F}_{ijk}^2 d\beta_0 \tag{19}$$

首先最大限度地满足水平聚焦条件: $\bar{F}_{200} = 0$ 是很重要的, 因此我们必须先对 I_{200} 进行优化. 为了适应各种型式的光谱仪器, 应在给定安装方式的情况下进行, 即假设已给定入射狭缝位置, r_0, α_0 , 和接收光

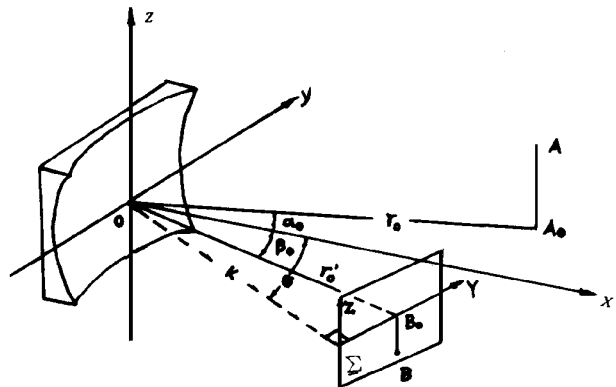


Fig. 2 Schematic diagram of the grating mounting optics

谱信号的谱面位置 θ_k , 以及其波段范围。这样优化 I_{200} 的条件为:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial I_{200}}{\partial R} &= 0 \\ \frac{\partial I_{200}}{\partial A_{200}} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

则在给定的安装方式下, 我们能够找到使 I_{200} 达到最小的光栅表面半径 R 和 A_{200} 。

一旦确定了 $r_0, \alpha_0, k, \theta, R, A_{200}$ 的适当值, 在 $i + j + k = 2$ 的情况下, I_{ijk} 的每一个积分就只是 A_{ijk} 的函数了。因此, 可以由 $\frac{\partial I_{ijk}}{\partial A_{ijk}} = 0$ 算出使 I_{ijk} 最小的 A_{ijk} 的值。由于 A_{ijk} 是四个记录参数 r_0, m, χ, δ 的函数, 并且在一般情况下还需满足预定的光栅常数 σ , 因此, 除了 A_{200} 外, 仅能再列出两个关于 A_{ijk} 的方程, 即还能使两种像差达到最小。如果欲多消除一个像差项, 即再解出三个 A_{ijk} 的值, 则要以不能保证光栅参数为代价了。

至于到底要解出哪个 A_{ijk} 的值, 则应视所要校正的像差而定。在实际中, 主要是使像散项 $[(ijk) = (020)]$ 和一彗差项 $[(ijk) = (300) \text{ 或 } (120)]$, 或者两个彗差项 $[(ijk) = (300), (120)]$ 最小化, 再由一个预先给定的有效光栅常数 σ , 下面方程组之一可联立解出:

$$(a) \text{ 消像散和一个彗差 } (F_{300}), \text{ 有: } \left. \begin{aligned} \sin \delta - \sin \gamma &= \frac{\lambda_0}{\sigma} \\ H_{200} &= \frac{\lambda_0}{\sigma} A_{200} \\ H_{020} &= \frac{\lambda_0}{\sigma} A_{020} \\ H_{300} &= \frac{\lambda_0}{\sigma} A_{300} \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

$$(b) \text{ 对于消像散和另一彗差 } (F_{120}), \text{ 有: } \left. \begin{aligned} \sin \delta - \sin \gamma &= \frac{\lambda_0}{\sigma} \\ H_{200} &= \frac{\lambda_0}{\sigma} A_{200} \\ H_{020} &= \frac{\lambda_0}{\sigma} A_{020} \\ H_{120} &= \frac{\lambda_0}{\sigma} A_{120} \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

$$(c) \text{ 对于消两个彗差 } [(300), (120)] \text{ 的有: } \left. \begin{aligned} \sin \delta - \sin \gamma &= \frac{\lambda_0}{\sigma} \\ H_{200} &= \frac{\lambda_0}{\sigma} A_{200} \\ H_{300} &= \frac{\lambda_0}{\sigma} A_{300} \\ H_{120} &= \frac{\lambda_0}{\sigma} A_{120} \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

从上面任意一个方程组中如果解出记录参数 r_c 、 r_D 、 χ 、 δ , 则一个适合于前面所给定的仪器参数并且消相应像差的平场凹面全息光栅的设计就基本完成了。

4 设计方案的评价

根据第三节的设计原理, 我们计算出了消象散和一个彗差 (F_{120}) 的全息凹面光栅的各参数。

$$r_0 = 210.0 \quad \alpha_0 = 9.6^\circ \quad k = 206.3923 \quad \theta = -8.0^\circ \quad R = 210.2954$$

$$R_C = 220.1870 \quad \gamma = 5.5178^\circ \quad R_D = 217.2086 \quad \delta = 11.1720^\circ$$

其波段范围为 $2000 \text{ \AA} \leq \lambda \leq 8000 \text{ \AA}$, 光栅常数 σ 为 $1/200$ 。

不妨假定在平的谱面上, 我们用二极管列阵作为接收器件, 由于二极管列阵的接收元高度为 2.5 mm , 因而可以取入射狭缝的高度为 2.4 mm , 即 $-1.2 \leq z \leq 1.2$ 。在光栅面积为 $60 \text{ (W)} \times 40 \text{ (M)} \text{ mm}^2$, 亦即 $-30 \leq \omega \leq 30$ 和 $-20 \leq \iota \leq 20$ 的情况下, 追迹了五条谱线, 即 λ 分别为 2000 \AA 、 2900 \AA 、 5000 \AA 、 7100 \AA 、 8000 \AA 。

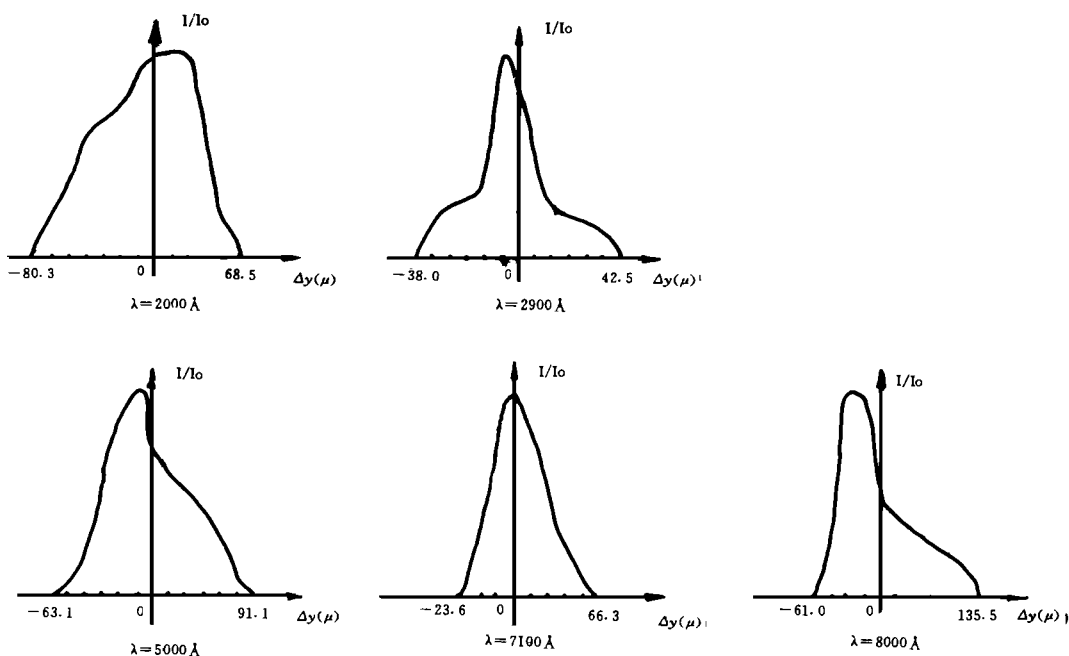


Fig 3 The line profiles of spectral images formed by the grating, at $\lambda = 2000, 2900, 5000, 7100, 8000 \text{ \AA}$ in the order - 1

Notice: The proportion of each horizontal coordinate above is different in order to express clearly.

为了得到各谱线的轮廓,我们通过计算各谱线在一定垂直窄条中的光点数量而绘出能量分布,如图3所示。图中2000 Å 的窄条宽度为11.4 μm, 2900 Å 的为6.0 μm, 5000 Å 的为13.0 μm, 7100 Å 的为9.4 μm, 8000 Å 的为19.3 μm。

现在我们来看各波长的分辨能力。由光栅方程: $\lambda = \sigma(\sin\alpha + \sin\beta)$

可得: $\Delta\lambda = \sigma \cos\beta * \Delta\beta$

如果令 ΔT 表示光谱张的半宽度的话,则分辨能力可表示为: $\Delta\lambda = \sigma \cos\beta * \frac{\Delta T}{r}$ 。

由这个公式,并根据图3所得的半宽度,我们可以得到各波长的光谱分辨能力,列于表1中。

Tab 1

	2000Å	2900Å	5000 Å	7100 Å	8000 Å
$\Delta T(\mu)$	80.3	15.1	78.1	38.0	67.7
$\Delta\lambda(\text{Å})$	19.2	3.6	18.8	9.2	16.4

从以上分析结果来看,我们所设计的凹面全息光栅的分辨能力对于一般的光谱分析已经令人满意。

5 结 束 语

在本文中主要是使光程函数的单个像差项减到最小。这种方法与日本学者波岗武用最小二乘法相比,有一个明显的优点,即整个设计过程比较简洁、利落,无须在多维空间里寻找,以使某一评价函数达到最佳。通过光线追迹,我们可以有把握地说,对于平场凹面光栅,目前的设计方法是行之有效的。

参 考 文 献

- [1] 吴振华 北光通讯, 1981, 2(3): 1~ 3
- [2] F. Masuda et al 分光研究, 1978, 27(3): 211~ 223
- [3] 波岗 武 东北大学科学计测研究所报告, 1980, 29(1): 65~ 75

Design of Flat Field Holographic Concave Grating

Chen Ji w u

(Geometric Metrology Office, China Institute of Metrology, Hangzhou 310034)

Ling Zhong

(Dept. of Optical Instruments, Zhejiang University, Hangzhou 310000)

Meng Q inghua

*(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)*

Abstract

A flat field holographic concave grating is one whose spectral field is in a plane. If a multichannel photodetector receives spectrum signals on the plane, spectrum analysis can be more simply and quickly, and instantaneous spectrum analysis can be achieved. Not only loss of light energy will be less, but the spectrometer will also be miniature, with collimating and dispersing and converging by the grating. In this paper, we design the grating by the theory of holographic concave grating, and present the method which calculates the radius of the grating surface and the record parameters in the condition of the given mount parameters. Through rays tracing, we evaluate the designed grating by the spot diagrams of spectral images formed by the grating, and by the relevant line profiles. The results are satisfactory.

Key words: Holography, Concave grating

陈吉武 男, 出生于1962年2月, 吉林省长春市人。1984年7月毕业于浙江大学光学仪器工程系激光技术专业, 1987年6月获得浙江大学光学仪器工程系光学仪器专业硕士学位。现任教于中国计量学院计量测试工程系精密仪器专业, 主要研究方向为在线测量。