

零像散宽波段平场全息凹面光栅的优化设计

孔 鹏^{1,2}, 唐玉国¹, 巴音贺希格^{1*}, 李文昊¹, 崔锦江³

1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049

3. 中国科学院苏州生物医学工程技术研究所, 江苏 苏州 215163

摘 要 平场全息凹面光栅的理想像面应为一平面, 此时子午焦线与弧矢焦线均位于像面内且彼此重合, 形成接近理想像点的光谱像。但子午焦线总是存在弯曲, 只有弧矢焦线在满足一定条件的情况下可以成为直线。鉴于此, 提出一种满足平场弧矢焦线条件的平场全息凹面光栅设计方法。利用光学设计软件 ZEMAX 研究了运用此方法设计的零像散光栅的成像特性, 并与原有设计方法得到的结果进行比较。模拟结果显示, 满足平场弧矢焦线条件的光栅能够达到与原有方法所设计光栅相当的光谱分辨率, 而其全波段零像散特性使其拥有更加出色的弧矢方向聚焦性能, 显著提高平场光谱仪的信噪比。

关键词 衍射光栅; 全息凹面光栅; 平场; 像差; 弧矢焦线; 子午焦线

中图分类号: O436.1 文献标识码: A DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2012)02-0565-05

引 言

平场全息凹面光栅是将所有波长的光谱成像在一个平面附近, 进而可以利用 CCD 等平面探测器进行接收, 从而能够快速全光谱分析^[1-3]。随着 CCD 技术的快速发展和日益成熟, 平场全息凹面光栅的应用领域迅速拓展并逐渐显示出其独特的巨大优势^[4, 5]。目前, 平场全息凹面光栅光谱仪正向着微小型化、宽波段、高分辨等方向发展。

平场全息凹面光栅的理想像面应为平面, 即子午焦线与弧矢焦线均位于同一平面内且彼此重合。但由于各种像差的存在, 子午焦线总呈现为曲线, 只能通过减小像差来降低子午焦线的弯曲程度^[6-8]。其优化设计方法主要有两种, 一种基于全息凹面光栅几何理论, 通过校正几何像差来压缩像面上光谱像的大小^[9-11]; 另一种基于光学设计软件如 ZEMAX^[12]和 CODE V 等, 由点列图评价像质然后逐步优化逼近。这两种方法都是将子午焦线与弧矢焦线优化拟合至预先假定的像平面, 达到最佳的子午与弧矢方向的聚焦性能。

文献[8]在研究了平场全息凹面光栅的像差特性后发现, 在光栅结构参量满足一定约束条件时弧矢焦线可以满足平场化条件, 并据此特性提出以下设计构想: 将像面置于平场弧

矢焦线所在平面, 然后对子午焦线进行优化拟合。但文献[8]没有给出具体的优化求解方法与设计结果。文献[13]给出一种通过拟合子午焦线与平场弧矢焦线对平场全息凹面光栅进行优化的方法: 令过光栅曲率中心并垂直于光栅法线的平面为像面(实际上是平场弧矢焦线所在的平面), 将子午焦线与像面拟合。实际上, 这是一种特殊情况, 在光栅参量满足特定条件时平场弧矢焦线可以是穿过光栅曲率中心的任意一条直线。

鉴于此, 本文提出一种基于平场弧矢焦线约束条件的平场全息凹面光栅设计方法, 并运用此方法设计一个微小型平场光谱仪用零像散宽波段平场全息凹面光栅。利用光学设计软件 ZEMAX 对设计结果进行模拟分析, 并与现有常规设计方法进行对比。

1 平场弧矢焦线

图 1 为平场全息凹面光栅制作结构与使用结构示意图。以光栅中心点 O 为原点建立直角坐标系, 光栅法线方向为 x 轴, 垂直刻线方向为 y 轴, 沿刻线方向为 z 轴。狭缝中心点 A 及其像点 B 、记录点 C 和 D 均位于子午面 xoy 内, $P(x, y, z)$ 为光栅上任一点。由 C 和 D 发出的记录光束的中心主

收稿日期: 2011-03-18, 修订日期: 2011-06-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(60478034), 国家“十一五”科技支撑计划重大项目(2006BAK03A02)和吉林省科技发展计划项目(20070523, 20086013)资助

作者简介: 孔 鹏, 1981 年生, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士研究生 e-mail: kongdapeng@yahoo.com.cn

* 通讯联系人 e-mail: bayin888@sina.com

光线 CO 和 DO 长度分别为 r_C , r_D , 与 x 轴夹角分别为 γ 和 δ 。由 A 发出波长为 λ 光束的中心主光线 AO 长度为 r_A , 与 x 轴夹角为 α , 经光栅衍射后第 m 级衍射光成像在探测器 B_1B_2 上 B 点, 像距 OB 长度为 r_B , 衍射角为 β 。 OH 为从 O 点向光谱面 B_1B_2 所作的垂线, 其长度为 r_H , 与 x 轴夹角为 β_H 。各角度的符号规则是: 以 x 轴为基准, 逆时针旋转所得角度符号为正, 顺时针旋转所得角度符号为负。

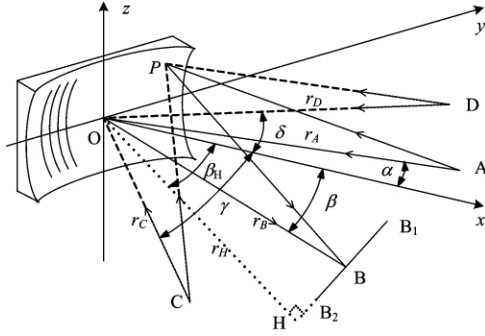


Fig 1 Recording and use geometry for flat-field holographic concave grating

根据全息凹面光栅几何理论^[6,7], 光线 APB 的光程函数 F 为

$$F = F_{00} + yF_{10} + \frac{1}{2}y^2F_{20} + \frac{1}{2}z^2F_{02} + \frac{1}{2}y^3F_{30} + \frac{1}{2}yz^2F_{12} + \frac{1}{8}y^4F_{40} + \frac{1}{4}y^2z^2F_{22} + \frac{1}{8}z^4F_{04} + \dots \quad (1)$$

式中 F_{ij} 为像差系数, F_{20} 代表离焦, F_{02} 代表像散, F_{30} 代表子午彗差, F_{12} 代表弧矢彗差, F_{40} , F_{22} 和 F_{04} 为球差, 省略号代表更高阶的像差, 在平场全息凹面光栅的优化设计中一般可以忽略不计。像差的阶越高对光栅成像的影响越小, 决定光栅子午方向成像性能的主要是离焦像差 F_{20} , 弧矢方向则主要是像散 F_{02} 。像差系数 F_{ij} 一般表示成如下形式

$$F_{ij} = M_{ij} + \frac{m\lambda}{\lambda_0} H_{ij} \quad (2)$$

其中 λ_0 为制作光栅所用激光波长, M_{ij} 只与使用结构参量有关, H_{ij} 只与制作结构参量有关。

由像散系数 $F_{02}=0$ 可以得到全息凹面光栅弧矢焦线的解析表达式

$$r_B = \frac{R}{\cos\beta - \frac{R\sigma H_{02}}{\lambda_0} \sin\beta + \cos\alpha - \frac{R\sigma H_{02}}{\lambda_0} \sin\alpha - \frac{R}{r_A}} \quad (3)$$

其中 σ 为有效光栅常数。在图 1 所示的坐标系中, 使子午面 xOy 内光谱成一条直线需满足关系 $x=ky+b$, 其中 k 表示直线斜率, b 为直线在 x 轴上的截距。由于 $x=r_B\cos\beta$, $y=r_B\sin\beta$, 所以将平场型谱面的解析式写成极坐标形式为

$$r_B = \frac{b}{\cos\beta - k\sin\beta} \quad (4)$$

对比式(3)与式(4)可知平场弧矢焦线需满足以下约束条件

$$b = R \quad (5)$$

$$H_{02} = \frac{k\lambda_0}{R\sigma} \quad (6)$$

$$r_A = \frac{R}{\cos\alpha - k\sin\alpha} \quad (7)$$

$$r_B = \frac{R}{\cos\beta - k\sin\beta} \quad (8)$$

由此可知平场弧矢焦线必穿过全息凹面光栅的曲率中心, 物点 A 需位于平场弧矢焦线的延长线上, 如图 2 所示。将光电阵列接收器件放置于平场弧矢焦线 B_1B_2 处, 通过选择适当的使用结构参量和制作结构参量就能使子午焦线与平场弧矢焦线相拟合, 此时便可接收到在子午、弧矢方向均具有良好聚焦性能的像斑。

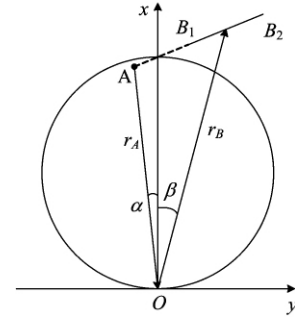


Fig 2 Optical geometry of the flat-field sagittal focal line

2 设计方法与结果讨论

2.1 常规设计方法

平场全息凹面光栅优化设计的目标就是找到使用结构参量和制作结构参量的最优组合, 这就需要首先定义一个优化函数。目前最常用的是基于像面上点列图大小的优化函数。根据文献[14], 像斑大小可以由像面上衍射光线的投射点相对主光线的偏移量来表示。子午光线偏移量 δy 与弧矢光线偏移量 δz 的表达式分别为

$$\delta y = \frac{r_B - y\sin\beta}{r_B\cos\beta} \left[(r_B - y\sin\beta) \frac{\partial F}{\partial y} - y\sin\beta \frac{\partial F}{\partial z} \right] \quad (9)$$

$$\delta z = (r_B - y\sin\beta) \frac{\partial F}{\partial z} \quad (10)$$

优化函数 W 的定义方法如下

$$W = \sum \omega_i \sum (\delta y + f\delta z)^2 \quad (11)$$

式中 $\sum (\delta y + f\delta z)^2$ 表示将对应于光栅表面若干点的光线偏移量进行求和, ω_i 为不同波长的加权因子。利用最优化方法便可求得使 W 最小化的使用结构和记录结构。表 1 所示为

Table 1 Design specifications for the flat-field holographic concave grating

Parameter	Value
Wavelength range/nm	350~850
Curvature radius/mm	96
order	+1
Spectral length/mm	25
Grating size/mm	φ30
Entrance slit width/μm	10
Entrance slit height/mm	0.4

平场全息凹面光栅的设计要求,表 2 为优化设计结果,制作光栅所用激光波长为 441.6 nm。

Table 2 Optimization parameters of the flat-field holographic concave grating

Mounting parameters		Recording parameters	
r_A/mm	88.496	r_C/mm	123.169
$\alpha/(^{\circ})$	-4.770	$\gamma/(^{\circ})$	12.418
r_H/mm	93.505	r_D/mm	140.638
$\beta_H/(^{\circ})$	-23.395	$\delta/(^{\circ})$	20.568

2.2 零像散平场全息凹面光栅的设计方法

在满足平场弧矢焦线约束条件式(5)~式(8)情况下,所有波长的像散均为零,因此所设计的光栅称为零像散平场全息凹面光栅。优化函数 W 的形式依然如式(11)所示,但此时光栅使用结构和记录结构不再是自由变量。入臂 r_A 需满足式(7),出臂 r_B 需满足式(8),制作结构参量 r_C, γ, r_D, δ 需满足式(6)。经过这些代换后,只有 α, β_H ($\beta_H = -\arctan k$) 以及三个制作结构参量是自由变量。利用最优化方法求得的光栅结构参量值列于表 3。

Table 3 Optimization parameters of the flat-field holographic concave grating without astigmatism

Mounting parameters		Recording parameters	
r_A/mm	92.324	r_C/mm	101.207
$\alpha/(^{\circ})$	-5.403	$\gamma/(^{\circ})$	10.560
r_H/mm	86.881	r_D/mm	113.260
$\beta_H/(^{\circ})$	-25.176	$\delta/(^{\circ})$	18.739

2.3 结果与讨论

为了论述方便,称原有的设计方法为常规设计方法(CM),满足平场弧矢焦线条件的设计方法为零像散设计方法(ZM)。图 3 为两种方法所设计平场全息凹面光栅的使用

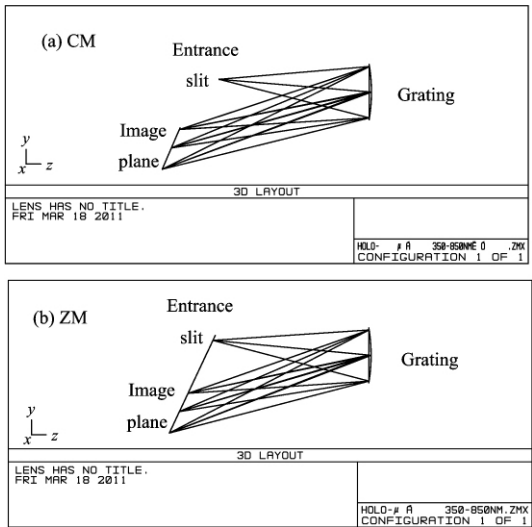


Fig 3 Use geometry of the gratings designed by different methods

结构示意图,二者的主要区别是零像散光栅的入缝与像面处于同一平面上。

利用 ZEMAX 进行模拟时,在入缝上选取 9 个物点,如图 4 所示。以入缝中心 O 为原点建立坐标系,入缝宽度方向为 Y 轴,高度方向为 X 轴。入缝宽度 $W=10 \mu\text{m}$,高度 $H=0.4 \text{ mm}$ 。所选取的 9 个物点的坐标分别为 $(Y, X) = (-5, 0.2), (-5, 0), (-5, -0.2), (0, 0.2), (0, 0), (0, -0.2), (5, 0.2), (5, 0), (5, -0.2)$ 。

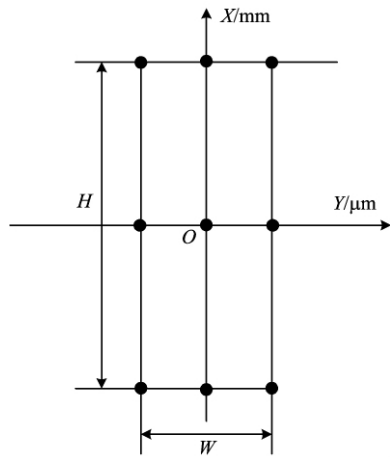


Fig 4 Coordinate system of the entrance slit

图 5 为两种光栅所成的光谱像斑大小在色散方向的均方根值(RMS),在 ZEMAX 中进行计算 RMS 值的设置时选择相对主光线(chief ray)的距离。从图中可以看出,两种光栅在色散方向 RMS 曲线相差不大,说明两者在子午方向的成像性能相当。

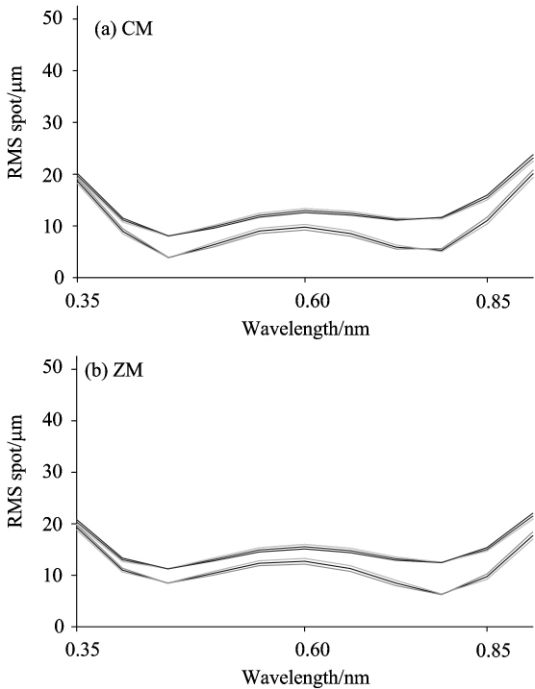


Fig 5 RMS spot Y vs. wavelength

图 6 为两种光栅所成的光谱像斑大小在垂直色散方向的均方根值(RMS), 计算 RMS 值时同样选择相对主光线(chief ray)的距离。从图中可以看出, 使用常规设计方法只能在某些波长处, 如图 6(a)中为 600 nm 附近, 将像高压缩的较好。而使用零像散设计方法则能够在全波段完全消除像散, 如图 6(b)所示, 所有波长处的光谱像高度均得到显著压缩。

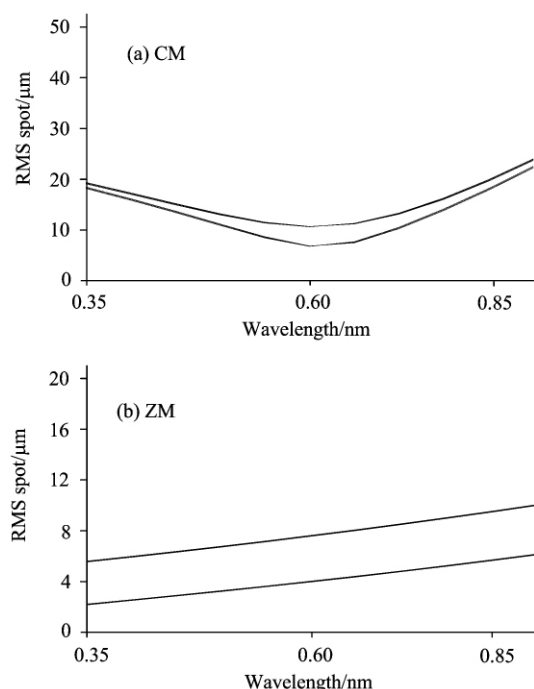


Fig 6 RMS spot X vs. wavelength

图 7 为两种光栅在 3 个波长处的点列图对比。从图中可以看出, 两者具有非常相近的光谱分辨率, 而运用零像散设计方法设计的光栅所成的光谱像具有更好的能量集中度。对于使用线阵探测器的平场光谱仪来说, 这种设计将大大增加进入接收器件的光通量, 对于提高仪器信噪比作用显著。

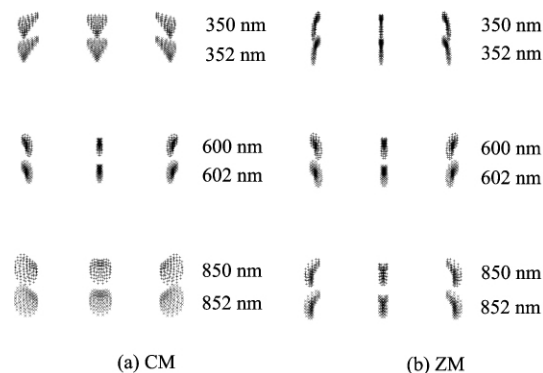


Fig 7 Comparison of spot diagrams

3 结 论

本文提出一种满足平场弧矢焦线约束条件的平场全息凹面光栅优化设计方法, 运用此方法设计一个用于微小型平场光谱仪的零像散宽波段平场全息凹面光栅。利用光学设计软件 ZEMAX 对设计结果进行模拟分析, 并与原有设计方法设计的光栅进行对比。模拟结果显示, 利用本文提出的零像散宽波段平场全息凹面光栅设计方法所设计的光栅能够达到与原有设计方法相当的光谱分辨率; 更重要的是, 全波段零像散的成像特性使这种光栅拥有更加出色的弧矢方向的聚焦性能, 对提高平场全息凹面光栅光谱仪的信噪比作用显著。

References

- [1] Hayat G S, Flamand J, Lacroix M, et al. Opt. Eng., 1975, 14(5): 420.
- [2] Lerner J M, Chambers R J, Passereau G. SPIE, 1981, 268: 122.
- [3] Sokolova E. J. Mod. Opt., 2000, 47: 2377.
- [4] JI Yi-qun, GONG Guang-biao, ZHU Shan-bing, et al(季轶群, 宫广彪, 朱善冰, 等). Optics and Precision Engineering(光学精密工程), 2009, 17(4): 727.
- [5] TANG Yu-guo, SONG Nan, Bayanheshig, et al(唐玉国, 宋楠, 巴音贺希格, 等). Optics and Precision Engineering(光学精密工程), 2010, 18(9): 1989.
- [6] Beutler H G. J. Opt. Soc. Am., 1945, 35(5): 311.
- [7] Noda H, Namioka T, Seya M. J. Opt. Soc. Am., 1974, 64: 1031.
- [8] Palmer C. Appl. Opt., 1989, 28(9): 1605.
- [9] Pavlycheva N K. Sov. J. Opt. Technol., 1979, 46: 394.
- [10] McKinney W R, Palmer C. Appl. Opt., 1987, 26: 3108.
- [11] CHEN Ji-wu, LIN Zhong, MENG Qing-hua(陈吉武, 林中, 孟庆华). Optics and Precision Engineering(光学精密工程), 1997, 5(1): 96.
- [12] LI Chao-ming, WU Jian-hong, ZHAO Yan-jiao, et al(李朝明, 吴建宏, 赵燕皎, 等). Journal of Optoelectronics · Laser(光电子·激光), 2006, 17(7): 828.
- [13] PI Dao-rui, HUANG Yuan-shen, ZHANG Da-wei, et al(皮道锐, 黄元申, 张大伟, 等). Acta Physica Sinica(物理学报), 2010, 59(2): 1009.
- [14] Chrisp M. Appl. Opt., 1983, 22: 1508.

Optimization of Broad-Band Flat-Field Holographic Concave Grating without Astigmatism

KONG Peng^{1,2}, TANG Yu-guo¹, Bayanheshig^{1*}, LI Wen-hao¹, CUI Jin-jiang³

1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3. Suzhou Institute of Biomedical Engineering and Technology, Chinese Academy of Sciences, Suzhou 215163, China

Abstract The desirable imaging locations of the flat-field holographic concave gratings should be in a plane. And the object can be imaged perfectly by the grating when the tangential focal curve and sagittal focal curve both superpose the intersection of the image plane and dispersion plane. But actually, the defocus can not be eliminated over the entire wavelength range, while the astigmatism vanishes when the grating parameters satisfy some conditions. An optimization method for broad-band flat-field holographic concave gratings with absolute astigmatism correction was proposed. The ray tracing software ZEMAX was used for investigating the imaging properties of the grating. And we made a comparison between spectral performance of gratings designed by this new method and that by conventional method, respectively. The results indicated that the spectral performance of gratings designed by using the absolute astigmatism correction method can be as good as gratings designed with the conventional method. And the focusing performance in the sagittal direction is much better, so that the S/N ratio can be greatly improved.

Keywords Diffraction grating; Holographic concave grating; Flat-field; Aberration; Sagittal focal curve; Tangential focal curve

(Received Mar. 18, 2011; accepted Jun. 28, 2011)

* Corresponding author