

基于超环面均匀线距光栅的成像光谱仪优化设计研究

薛庆生, 王淑荣

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

摘要 根据凹面光栅的几何像差理论, 提出了一种基于超环面均匀线距光栅的成像光谱仪优化设计方法, 该方法利用遗传算法和光学设计软件 ZEMAX 两次优化来获得最优的光学结构参数。以设计一个远紫外成像光谱仪为实例, 工作波段 110~180 nm, 狭缝尺寸 50 μm \times 5 mm, 数值孔径 0.1, 利用 ZEMAX 软件对设计结果进行了分析和评价, 结果表明, 不同波长的光学传递函数在奈奎斯特频率 101 P/mm 处均大于 0.7, 点列图半径的均方根值小于 14 μm , 在工作波段内获得了良好的成像质量, 满足空间分辨率 0.5 mrad, 光谱分辨率 0.6 nm 的设计要求, 也证明了该优化设计方法是可行的, 可在其他波段推广应用, 对光栅色散型成像光谱仪的设计具有指导意义。

关键词 成像光谱仪; 光学设计; 超环面均匀线距光栅; 遗传算法; ZEMAX

中图分类号: TH744.1 文献标识码: A DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2013)05-1433-05

引言

随着现代光谱技术的高速发展和应用, 光栅色散型光谱仪在现代工业、农业和空间遥感方面正在得到越来越广泛的应用^[1-3], 与棱镜色散光谱仪相比, 具有色散均匀、光谱分辨率高的特点。目前, 光栅色散型光谱仪大多使用的是基于平面光栅的 Czerny-Turner 光谱仪^[4, 5], 它由 3~4 个光学元件组成。在远紫外大气遥感^[6]等弱信号探测领域, 由于信号非常弱, 要求光谱仪光学系统具有较高传输效率。凹面光栅自身同时具有色散和聚焦能力, 单块凹面光栅就可构成凹面光栅光谱仪, 光学元件少, 因此能量传输效率高。在远紫外波段, 凹面光栅光谱仪可以比 Czerny-Turner 光谱仪的能量利用率提高 5 倍左右。但普通的凹面光栅的基底为球面, 光栅的线距均匀, 也称为球面均匀线距光栅^[7], 由于光线的离轴入射, 球面光栅的成像质量差, 在狭缝长度方向上存在很大的像散, 只能用在不要空间分辨率的单色仪^[8]和采用线阵探测器的多通道分析仪^[9]中, 不能满足成像光谱仪的空间分辨率要求。

成像光谱仪与单色仪相比, 不但要求较高的光谱分辨率, 还要求具有一定的空间分辨率, 需要较高的成像质量^[10]。为同时满足高能量利用率和高成像质量的要求, 提出采用凹面超环面均匀线距光栅, 即光栅基底为超环面, 光栅刻线线距均匀。光栅色散方向和垂直光栅色散方向具有不同

的曲率半径, 此种光栅在超环面上通过机械刻划的方法容易实现^[11]。超环面均匀线距光栅成像光谱仪的设计复杂, 单纯的利用商用光学设计软件 ZEMAX 或 CODE V 等优化, 收敛的速度很慢, 非常耗时, 并且很难获得最佳的光学结构参数解。

根据凹面光栅的几何像差理论, 提出一种基于超环面均匀线距光栅的成像光谱仪优化设计方法, 该方法利用遗传算法和 ZEMAX 光学设计软件两次优化获得最优的光学结构参数。以设计一个远紫外波段(110~180nm)成像光谱仪光学系统为实例, 并利用 ZEMAX 软件进行了光线追迹、性能分析和评价, 结果满足设计指标要求, 证明了本优化设计方法是可行的。

1 优化设计方法

图 1 为凹面光栅的光学结构图, 以凹面光栅的顶点 O 为坐标原点建立直角坐标系, x 轴方向为过顶点 O 的法线方向, 光栅刻线方向平行于 z 轴, y 轴垂直于光栅刻线方向。 $A(x_A, y_A, z_A)$ 为入射狭缝平面上的一点, $B(x_B, y_B, z_B)$ 为 A 点经凹面光栅的 m 衍射在焦平面上所成的像点, $P(x_B, y_B, z_B)$ 为光栅面上的任意一点。在整个光栅面上, 光栅线距为常数 σ_0 , α , β 分别为入射角和衍射角, r_A 和 r_B 分别为入射臂和出射臂的长度。

收稿日期: 2012-08-20, 修订日期: 2012-10-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(41105014)资助

作者简介: 薛庆生, 1979 年生, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所副研究员 e-mail: qshxue2006@163.com

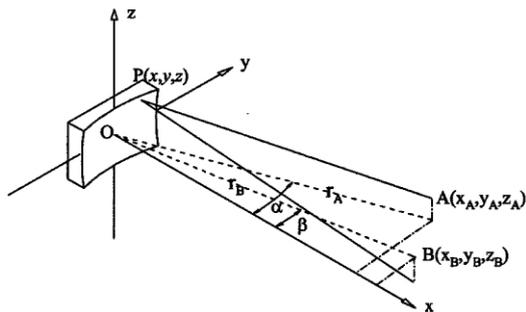


Fig 1 Schematic of the optical layout of a concave grating

光线 APB 的光程函数^[12]为

$$F = \langle AP \rangle + \langle PB \rangle + \frac{m\lambda}{\sigma_0} \tag{1}$$

其中,

$$\langle AP \rangle = [(x_A - x)^2 + (y_A - y)^2 + (z_A - z)^2]^{1/2} \tag{2}$$

$$\langle PB \rangle = [(x_B - x)^2 + (y_B - y)^2 + (z_B - z)^2]^{1/2} \tag{3}$$

式中, m 为衍射级次, λ 为波长, σ_0 为光栅线距。

x_A, y_A, x_B 和 y_B 在极坐标下可表示为

$$x_A = r_A \cos\alpha \tag{4}$$

$$y_A = r_A \sin\alpha \tag{5}$$

$$x_B = r_B \cos\beta \tag{6}$$

$$y_B = r_B \sin\beta \tag{7}$$

把式(4)~式(7)带入式(2)和(3)得

$$\langle AP \rangle = [r_A^2 + z_A^2 + (x^2 + y^2 + z^2) - 2xr_A \cos\alpha - 2yr_A \sin\alpha - 2z_A z]^{1/2} \tag{8}$$

$$\langle PB \rangle = [r_B^2 + z_B^2 + (x^2 + y^2 + z^2) - 2xr_B \cos\beta - 2yr_B \sin\beta - 2z_B z]^{1/2} \tag{9}$$

在光栅色散方向(子午方向)和垂直光栅色散方向(弧矢方向)引入不同的曲率半径, 子午方向和弧矢方向的半径分别为 R 和 ρ , 则超环面光栅的方程可表示为

$$x = \frac{y^2}{2R} + \frac{z^2}{2\rho} + \frac{y^4}{8R^3} + \frac{z^4}{8\rho^3} + \frac{y^2 z^2}{4R^2 \rho} + \dots \tag{10}$$

把式(8), 式(9), 式(10)带入(1)式, 并把光程函数 F 展开为 y, z 的泰勒级数

$$F = r_A + r_B + \sum_{i,j} y^i z^j F_{ij} = r_A + r_B + yF_{10} + zF_{01} + y^2 F_{20} + z^2 F_{02} + yzF_{11} + y^3 F_{30} + yz^2 F_{12} + y^2 zF_{21} + y^4 F_{40} + y^2 z^2 F_{22} + z^4 F_{04} + O(y^5) \tag{11}$$

其中,

$$F_{10} = -\sin\alpha \left(1 - \frac{z_A^2}{2r_A^2}\right) - \sin\beta \left(1 - \frac{z_B^2}{2r_B^2}\right) + \frac{m\lambda}{\sigma_0} \tag{12}$$

$$F_{01} = -\frac{z_A}{r_A} - \frac{z_B}{r_B} \tag{13}$$

$$F_{20} = \frac{1}{2} \left(\frac{\cos^2\alpha}{r_A} + \frac{\cos^2\beta}{r_B} - \frac{\cos\alpha + \cos\beta}{R} \right) + \frac{z_A^2}{2r_A^2} \left(\frac{\sin^2\alpha}{r_A} - \frac{\cos^2\alpha}{r_A} + \frac{\cos\alpha}{2R} \right) + \frac{z_B^2}{2r_B^2} \left(\frac{\sin^2\beta}{r_B} - \frac{\cos^2\beta}{r_B} + \frac{\cos\beta}{2R} \right) \tag{14}$$

$$F_{02} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{r_A} + \frac{1}{r_B} - \frac{\cos\alpha + \cos\beta}{\rho} \right) -$$

$$\frac{z_A^2}{4r_A^2} \left(\frac{3}{r_A} - \frac{\cos\alpha}{\rho} \right) - \frac{z_B^2}{4r_B^2} \left(\frac{3}{r_B} - \frac{\cos\beta}{\rho} \right) \tag{15}$$

$$F_{11} = -\sin\alpha \frac{z_A}{r_A} - \sin\beta \frac{z_B}{r_B} \tag{16}$$

$$F_{30} = \frac{\sin\alpha}{2r_A} \left(\frac{\cos^2\alpha}{r_A} - \frac{\cos\alpha}{R} \right) + \frac{\sin\beta}{2r_B} \left(\frac{\cos^2\beta}{r_B} - \frac{\cos\beta}{R} \right) \tag{17}$$

$$F_{12} = \frac{1}{2} \frac{\sin\alpha}{r_A} \left(\frac{1}{r_A} - \frac{\cos\alpha}{\rho} \right) + \frac{1}{2} \frac{\sin\beta}{r_B} \left(\frac{\cos^2\beta}{r_B} - \frac{\cos\beta}{\rho} \right) \tag{18}$$

$$F_{21} = - \left[\frac{z_A}{r_A^2} \sin^2\alpha + \frac{z_B}{r_B^2} \sin^2\beta \right] \tag{19}$$

$$F_{40} = \frac{\sin^2\alpha}{2r_A^2} \left(\frac{\cos^2\alpha}{r_A} - \frac{\cos\alpha}{R} \right) + \frac{1}{8R^2} \left(\frac{1}{r_A} - \frac{\cos\alpha}{R} \right) - \frac{1}{8r_A^2} \left(\frac{\cos^2\alpha}{r_A} - \frac{\cos\alpha}{R} \right)^2 + \frac{1}{8R^2} \left(\frac{1}{r_B} - \frac{\cos\beta}{R} \right) + \frac{\sin^2\beta}{2r_B^2} \left(\frac{\cos^2\beta}{r_B} - \frac{\cos\beta}{R} \right) + \frac{1}{8R^2} \left(\frac{1}{r_B} - \frac{\cos\beta}{R} \right) - \frac{1}{8r_B^2} \left(\frac{\cos^2\beta}{r_B} - \frac{\cos\beta}{R} \right)^2 \tag{20}$$

$$F_{22} = \frac{1}{4} \left[\frac{2\sin^2\alpha}{r_A^2} \left(\frac{1}{r_A} - \frac{\cos\alpha}{\rho} \right) - \frac{1}{r_A} \left(\frac{\cos^2\alpha}{r_A} - \frac{\cos\alpha}{R} \right) \right] \times \left(\frac{1}{r_A} - \frac{\cos\alpha}{\rho} \right) + \frac{1}{R\rho} \left(\frac{1}{r_A} - \frac{\cos\alpha}{R} \right) + \frac{1}{4} \left[\frac{2\sin^2\beta}{r_B^2} \left(\frac{1}{r_B} - \frac{\cos\beta}{\rho} \right) - \frac{1}{r_B} \left(\frac{\cos^2\beta}{r_B} - \frac{\cos\beta}{R} \right) \right] \times \left(\frac{1}{r_B} - \frac{\cos\beta}{\rho} \right) + \frac{1}{R\rho} \left(\frac{1}{r_B} - \frac{\cos\beta}{R} \right) \tag{21}$$

$$F_{04} = \frac{1}{8} \left[-\frac{1}{r_A} \left(\frac{1}{r_A} - \frac{\cos\alpha}{\rho} \right)^2 + \frac{1}{\rho^2} \left(\frac{1}{r_A} - \frac{\cos\alpha}{\rho} \right) \right] + \frac{1}{8} \left[-\frac{1}{r_B} \left(\frac{1}{r_B} - \frac{\cos\beta}{\rho} \right)^2 + \frac{1}{\rho^2} \left(\frac{1}{r_B} - \frac{\cos\beta}{\rho} \right) \right] \tag{22}$$

$O(y^5)$ 为高次项, 是小量, 可忽略。根据费马原理, 成理想像的条件为: $\partial F / \partial w = \partial F / \partial l = 0$, 即 $F_{ij} = 0$ 。在实际设计中不可能完全满足理想成像条件, 只能使 F_{ij} 接近于 0, 从而使像差最小。

F_{01} 与光谱仪的成像放大倍率有关。由 $F_{01} = 0$ 得到

$$\frac{z_A}{r_A} = -\frac{z_B}{r_B} \tag{23}$$

F_{10} 与光栅色散有关, 由 $F_{10} = 0$, 并利用式(23)得到光栅方程

$$(\sin\alpha + \sin\beta) \left(1 - \frac{z_A^2}{2r_A^2}\right) = \frac{m\lambda}{\sigma_0} \tag{24}$$

从式(24)可知, 入射角 α 一定的条件下, 不同波长的光的衍射角 β 不同, 并且 β 与入射狭缝上的位置 z_A 有关。

F_{20} 为色散方向(子午方向)的初级聚焦条件, F_{02} 为垂直色散方向(弧矢方向)的初级聚焦条件, F_{11} 为离轴点在色散方向和垂直色散方向的初级聚焦条件, F_{30}, F_{40} 和 F_{04} 为高级聚焦条件, F_{12}, F_{21} 和 F_{22} 为彗差校正条件。从式(12)~式(23)可以看出, F_{ij} 与光学结构参数 $r_A, r_B, \alpha, \beta, \rho$ 和 R 等的光学结构参数变化关系复杂, 无法求出数值解。构造像差优化函数

$$f(r_A, r_B, \alpha, \beta, \rho, R, z_A, z_B) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (F_{20}^2 + F_{02}^2 +$$

$$F_{11}^2 + F_{30}^2 + F_{12}^2 + F_{21}^2 + F_{40}^2 + F_{22}^2 + F_{04}^2) d\lambda \quad (25)$$

目标是寻找一系列的优化参数使像差优化函数式(25)最小。条件是结构布局合理,不出现挡光,同时要满足光谱分辨率的要求。

考虑到结构布局的合理性,要求入射角 α 满足

$$\alpha_1 \leq \alpha \leq \alpha_2 \quad (26)$$

超环面成像光谱仪的理论光谱分辨率与入射狭缝宽度 s 、探测器的像元尺寸 p 、入射臂 r_A 和 r_B , 光谱维线色散长度 l 等有关。线色散率为

$$\frac{dl}{d\lambda} = \frac{r_B m}{\sigma_0 \cos\beta} \quad (27)$$

由探测器的像元尺寸决定的带宽 $\Delta\lambda_p$ 为

$$\Delta\lambda_p = \frac{p\sigma_0 \cos\beta}{r_B m} \quad (28)$$

由狭缝宽度决定的带宽 $\Delta\lambda_s$ 为

$$\Delta\lambda_s = \frac{s\sigma_0 \cos\beta}{r_A m} \quad (29)$$

成像光谱仪的光谱分辨率 $\Delta\lambda$ 由 $\Delta\lambda_p$ 和 $\Delta\lambda_s$ 中数值大的决定。

设计时,要先根据光谱分辨率的要求,选择初始的结构参数 r_A, r_B, m 和 σ_0 ,并在优化时,把 r_A 和 r_B 作为控制条件

$$r_{A1} \leq r_A \leq r_{A2} \quad (30)$$

$$r_{B1} \leq r_B \leq r_{B2} \quad (31)$$

像差优化函数与光学结构参数之间的关系复杂,直接用 ZEMAX 或 CODE V 等商业光学设计软件优化,收敛的速度很慢,并且很难得到最佳的光学结构参数。为了快速、准确地寻求一组光学结构参数使像差优化函数式(25)最小,采用遗传算法(GA)和光学设计软件 ZEMAX 两次优化的设计方法。利用 Matlab 编写了目标适应函数式(25)和种群约束函数式(26)、式(30)和式(31)。先用遗传算法优化得到一次优化的光学结构参数,然后利用 ZEMAX 光学设计软件对一次优化得到的光学结构参数进行二次优化得到最终的光学结构参数。

2 设计实例与分析

利用超环面光栅成像光谱仪优化设计方法设计一个工作在远紫外波段的成像光谱仪,其主要用于中间层、低热层和电离层等高层大气的遥感。远紫外成像光谱仪的主要技术指标如表 1 所示。

Table 1 Technique requirement of FUV imaging spectrometer

Spectral range	110~180 nm
Spectral resolution	0.6 nm
Spatial resolution	0.5 mrad
Objective numerical aperture	0.1
Slit size	50 μm \times 5 mm
Detector array size	256 \times 256
Detector pixel size	50 μm \times 50 μm

设计时,首先根据光谱分辨率的要求,约束光学结构的

参数范围。为保证光学结构的合理性,入射角 α 需满足

$$3^\circ < \alpha < 10^\circ \quad (32)$$

光谱仪的光谱分辨率 $\Delta\lambda$ 为 0.6 nm,入射狭缝宽度 $s = 50 \mu\text{m}$,探测器的像元尺寸 $p = 50 \mu\text{m}$,取光栅线距 $\sigma_0 = 1/600 \text{ mm}$,由式(27)和式(28)确定入射臂和出射臂的范围为

$$\begin{cases} 157 < r < 163 \\ 157 < r' < 163 \end{cases} \quad (33)$$

以式(32)和式(33)为种群约束函数,利用遗传算法优化得到一次优化的光学结构参数,再以一次优化得到的光学结构参数为基础,利用 ZEMAX 光学设计软件进行二次优化,得到最终的光学结构参数如表 2 所示,光学结构如图 2 所示。图 3 为不同波长的光学传递函数曲线,不同波长的光学传递函数在奈奎斯特频率 $10 \text{ lp} \cdot \text{mm}^{-1}$ 处均大于 0.7,空间分辨率为 0.3 mrad,满足空间分辨率 0.5 mrad 的指标要求。入射狭缝上的一个物点,在像面上所成像点是一组弥散斑,每个弥散斑对应不同的波长。图 4 为不同波长的点列图半径的 RMS 值随波长的变化关系曲线,可以看出,在整个工作波段内,点列图半径的 RMS 值均小于 $14 \mu\text{m}$,且不同波长不同视场的点列图半径差别不大,实现了不同波长,不同视场像差的综合平衡和校正,在整个工作波段内同时获得了良好的成像质量。图 5 为间隔为 0.6 nm 的两波长(180 和 179.4 nm, 145 和 145.6 nm, 110 和 110.6 nm)的点列图分布,从图 5 可看出间隔为 0.6 nm 的两波长的点列图在像面上明显分开,表明光谱分辨率优于 0.6 nm 的指标要求。

Table 2 Structure parameter optimized by GA and ZEMAX software

Parameters	Genetic algorithm (GA)	ZEMAX software
$\alpha/(\text{°})$	4.99	5
σ_0/mm	1/600	1/600
r/mm	161.345	160.006
r'/mm	158.043 7	159.095
ρ/mm	159.405	159.368
R/mm	160	160

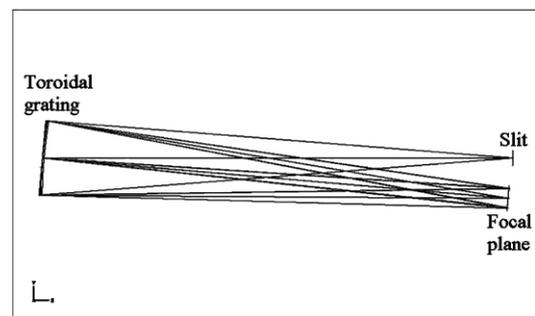


Fig 2 Layout of FUV imaging spectrometer

3 结论

基于超环面均匀线距光栅的成像光谱仪具有光学元件少,能量传输效率高,是远紫外遥感等微弱信号探测的首

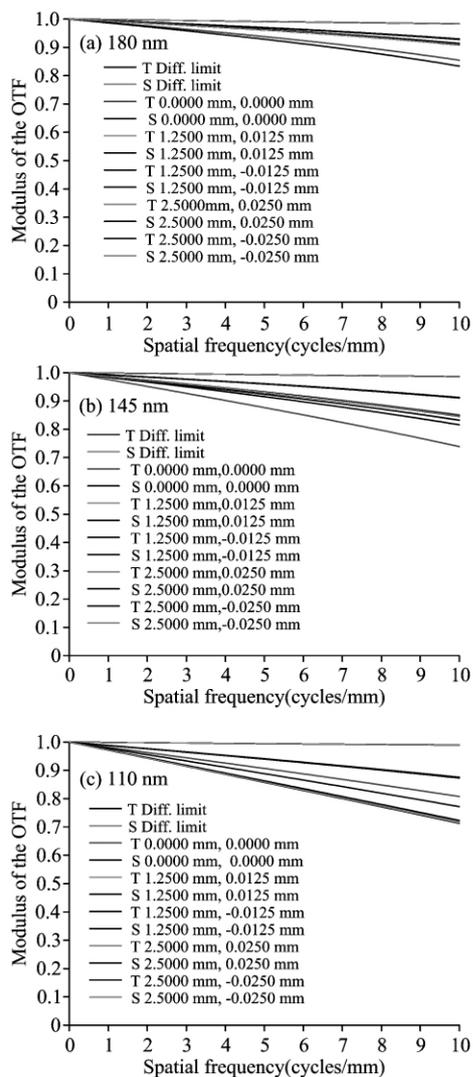


Fig 3 MTF of different wavelengths for FUV imaging spectrometer

选。根据凹面光栅的几何像差理论，提出了一种基于超环面均匀线距光栅的成像光谱仪优化设计方法，该方法利用遗传算法和光学设计软件 ZEMAX 两次优化来获得最优的光学结构参数，提高了收敛的速度和设计结果准确性。设计了一个远紫外成像光谱仪实例，工作波段 110~180 nm，入射狭缝尺寸 $50 \mu\text{m} \times 5 \text{mm}$ ，数值孔径 0.1。对设计结果的分析表明，不同波长的光学传递函数在奈奎斯特频率 $10 \text{lp} \cdot \text{mm}^{-1}$ 处均

References

[1] YU Lei, QU Yi, LIN Guan-yu, et al(于磊, 曲艺, 林冠宇, 等). Acta Optica Sinica(光学学报), 2011, 31(1): 0112011.
 [2] LIU Guang-hong, WU Gang, LING Qing, et al(刘光宏, 吴刚, 凌青, 等). Acta Optica Sinica(光学学报), 2011, 31(3): 0322001.
 [3] XUE Qing-sheng, HUANG Yu, LIN Guang-yu(薛庆生, 黄煜, 林冠宇). Acta Optica Sinica(光学学报), 2011, 31(8): 0822001.
 [4] XUE Qing-sheng, WANG Shu-rong, LI Fu-tian(薛庆生, 王淑荣, 李福田). Acta Optica Sinica(光学学报), 2010, 30(5): 1516.
 [5] XUE Qing-sheng, CHEN Wei(薛庆生, 陈伟). Optics and Precision Engineering(光学精密工程), 2012, 20(2): 233.
 [6] WU Yan, TANG Yi, LIU Jian-peng, et al(吴雁, 唐义, 刘健鹏, 等). Acta Optica Sinica(光学学报), 2012, 32(1): 0122001.
 [7] XUE Qing-sheng, WANG Shu-rong, LI Fu-tian(薛庆生, 王淑荣, 李福田). Opto-Electronic Engineering(光电工程), 2008, 35(7):

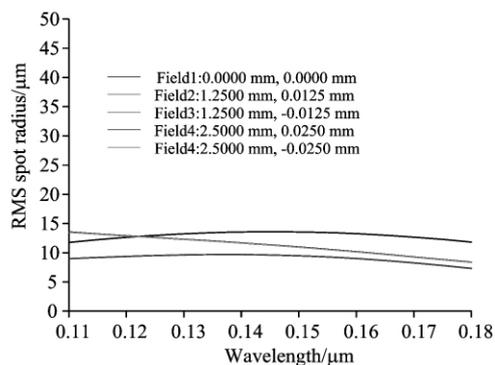


Fig 4 RMS spot radius vs wavelength

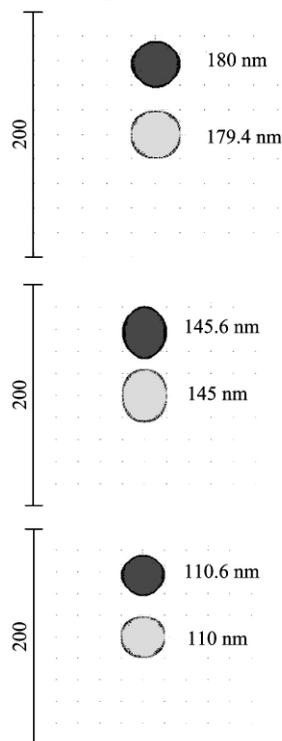


Fig 5 Spot diagram of different wavelengths for FUV imaging spectrometer

大于 0.7，点列图半径的均方根值小于 $14 \mu\text{m}$ ，在工作波段内获得了良好的成像质量，满足空间分辨率 0.5 mrad，光谱分辨率 0.6 nm 的设计指标要求，证明了提出的优化设计方法是可行的，可在其他波段推广应用，对光栅色散型成像光谱仪的设计具有指导意义。

116.

- [8] ZENG Jin, Bianheshig, LI Wen-hao(曾 瑾, 巴音贺希格, 李文昊). Acta Optica Sinica(光学学报), 2012, 32(2): 0222003.
- [9] WU Jian-fen, ZHAO Lei, CHEN Yong-yan, et al(武建芬, 赵 雷, 陈永彦). Acta Optica Sinica(光学学报), 2012, 32(4): 0409002.
- [10] XUE Qing-sheng, WANG Shu-rong, LU Feng-qin(薛庆生, 王淑荣, 鲁凤芹). Acta Optica Sinica(光学学报), 2009, 29(1): 35.
- [11] XU Ting, LÜ Li-jun(徐 挺, 吕丽军). Acta Optica Sinica(光学学报), 2010, 30(9): 2646.
- [12] Tatsuo Harada, Hideo Sakuma. Applied Optics, 1998, 37(28): 6803.

Optimum Design of Imaging Spectrometer Based on Toroidal Uniform-Line-Spaced (TULS) Spectrometer

XUE Qing-sheng, WANG Shu-rong

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

Abstract Based on the geometrical aberration theory, a optimum-design method for designing an imaging spectrometer based on toroidal uniform grating spectrometer is proposed. To obtain the best optical parameters, twice optimization is carried out using genetic algorithm(GA) and optical design software ZEMAX. A far-ultraviolet(FUV) imaging spectrometer is designed using this method. The working waveband is 110~180 nm, the slit size is $50\ \mu\text{m}\times 5\ \text{mm}$, and the numerical aperture is 0.1. Using ZEMAX software, the design result is analyzed and evaluated. The results indicate that the MTF for different wavelengths is higher than 0.7 at Nyquist frequency $10\ \text{lp}\cdot\text{mm}^{-1}$, and the RMS spot radius is less than $14\ \mu\text{m}$. The good imaging quality is achieved over the whole working waveband, the design requirements of spatial resolution 0.5 mrad and spectral resolution 0.6 nm are satisfied. It is certificated that the optimum-design method proposed in this paper is feasible. This method can be applied in other waveband, and is an instruction method for designing grating-dispersion imaging spectrometers.

Keywords Imaging spectrometer; Optical design; Toroidal uniform-line-spaced grating; Genetic algorithm; ZEMAX

(Received Aug. 20, 2012; accepted Oct. 31, 2012)