

# 应用全息变间距光栅的极紫外成像光谱仪 光学系统设计

刘 壮<sup>1,2</sup> 巩 岩<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033)

<sup>2</sup>中国科学院研究生院, 北京 100049

**摘要** 随着对太阳等离子体活动物理过程研究的深入,对太阳极紫外成像光谱仪的性能要求越来越高,而设计高性能太阳极紫外成像光谱仪的一个重要方法就是应用变间距光栅。提出了一种应用全息变间距光栅的太阳极紫外成像光谱仪的设计方法:首先设计系统的初始光学结构,然后根据全息变间距光栅光程差原理,利用 1stopt 软件的通用全局优化算法计算出像差小的光栅,最后用 Zemax 软件对整个系统进行建模与优化。给出了设计实例,设计出的太阳极紫外成像光谱仪工作波长范围为 17~21 nm,视场为 2400",空间分辨率为 0.6",光谱分辨率为 0.00225 nm/pixel,长度约为 2 m。在光谱范围内,空间方向与光谱方向的均方根半径以及截止频率范围内的调制传递函数均满足要求。

**关键词** 光学设计;成像光谱仪;全息变间距光栅;通用全局优化;极紫外;Zemax 软件

**中图分类号** O434 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201239.1116001

## Design of Optical System for Solar Extreme-Ultraviolet Imaging Spectrometer Using Holographic Varied Line Spacing Grating

Liu Zhuang<sup>1,2</sup> Gong Yan<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China  
<sup>2</sup> Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** With the in-depth research in the physical process of solar activities, the demand for the performance of solar extreme-ultraviolet imaging spectrometer is increasing. One important method of designing high-performance sun extreme-ultraviolet imaging spectrometer is to use the holographic varied line spacing grating. The design method is presented in this paper as follows. The initial optical structure of the system is designed firstly. Then the grating whose aberration is small is calculated based on holographic varied line spacing grating's optical path difference theory and universal global optimization of 1stopt software. The entire system is modeled and optimized with optical design software Zemax finally. A design example is given with the working band of 17~21 nm, the field of view of 2400", the spatial resolution of 0.6", the spectral resolution of 0.00225 nm/pixel, and the length of about 2 m. In the spectral range, the root mean square radii in spatial direction and spectral direction and the modulation transfer function in the cutoff frequency range all satisfy the requirement.

**Key words** optical design; imaging spectrometer; holographic varied line spacing grating; universal global optimization; extreme ultraviolet; Zemax software

**OCIS codes** 120.4570; 090.2890; 340.7480

收稿日期: 2012-06-01; 收到修改稿日期: 2012-07-01

基金项目: 国家自然科学基金(40974110)资助课题。

作者简介: 刘 壮(1986—), 博士研究生, 主要从事光学系统设计和成像光谱技术等方面的研究。

E-mail: zhuangzhilingyun2007@yahoo.com.cn

导师简介: 巩 岩(1968—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事光机集成设计和系统装调技术等方面的研究。

E-mail: ygng2000@sina.com

# 1 引 言

太阳极紫外成像光谱仪(SEUIS)是用于观测太阳极紫外波段光谱辐射线的仪器。通过测量和分析太阳重要辐射线的强度与线形,可获得太阳大气中等离子体的温度、密度、流速与分布量等信息,为研究日冕变热、太阳风加速等太阳活动的机理提供了必要条件<sup>[1]</sup>。

自从1971年9月人类首次应用SEUIS以来,这种仪器已为太阳物理活动的研究提供了大量有价值的资料,同时随着科学家对太阳探索的深入,对这一仪器探测能力的要求也越来越高。高性能的SEUIS必须兼备高空间分辨率、高光谱分辨率、高灵敏度与结构紧凑等属性。传统的光学元件很难同时满足这些要求。目前最先进的SEUIS是由Solar B卫星所搭载的极紫外成像光谱仪(EIS),视场角为512",像元空间分辨率为1.0(")/pixel,光谱分辨率为0.00223 nm/pixel,总长度约为3 m,采用线密度为4200 mm<sup>-1</sup>的光栅<sup>[2]</sup>。

变间距光栅具有任意变化的沟槽外形,因而可以通过控制基底与沟槽的形状来改变光线经过光栅后的光程差,进而提高成像质量。它的应用为提高相关光学系统的性能提供了极好的技术条件,是未来高性能SEUIS发展的必然趋势。目前在国内,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所已可制作出全息凹面变间距光栅<sup>[3,4]</sup>。

本文提出了一种应用全息变间距光栅的SEUIS的设计方法。设计了一种太阳极紫外成像光谱仪光学系统,在设计时加入记录光学系统的设计,可将记录光路的信息及时反馈到成像系统。该SEUIS设计的综合性能较应用等间距光栅SEUIS的性能有了提高。

# 2 设计原理

## 2.1 太阳极紫外成像光谱仪的特点

在极紫外波段存在大量原子共振线与吸收线,任何材料对此波段辐射都存在严重的吸收,所以相关元件多采用反射式的光学元件,尽管如此,反射率通常也较低<sup>[5]</sup>。想要提高系统的灵敏度,必须尽可能地减少元件数量,这给高性能SEUIS的设计带来了极大的制约。目前,能量利用率最高的SEUIS结构只采用两个反射面——望远系统采用离轴抛物面反射镜,分光系统采用无像散等间距光栅。无像散等间距光栅在放大率大于1时的成像质量差。为提

高系统的空间分辨率与光谱分辨率,可采用的方法只能是增加望远系统的焦距,增加光栅的入射臂长度或是增加光栅的线密度,最终将会增大系统的长度与研制成本。

## 2.2 全息变间距光栅光程差原理

### 2.2.1 变间距光栅使用光路光程差理论

SEUIS的分光系统由入射狭缝、凹面光栅、探测器组成。图1所示为一个椭球面凹面光栅的SEUIS分光系统的光学结构图。假设入射狭缝上一点A(x,y,z)发出的一条光线在距离光栅中心点O第n条沟槽的点P(ξ,ω,l)发生衍射,从点P衍射的波长为λ的第m级光通过点B,则光线APB的光程函数为

$$F = \langle AP \rangle + \langle PB \rangle + mn\lambda, \quad (1)$$

式中⟨·⟩表示线段的长度。后置光学系统设计的主要内容就是通过调整光栅基底与栅距的参数令F取最小值。根据费马定理,得到扩展方程

$$F = \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \omega^i l^j z^k F_{ijk}, \quad (2)$$

$$j = 2n, n = 0, 1, 2, 3, \dots,$$

z为入射狭缝上入射点的Z坐标,F<sub>ijk</sub>函数可展开为

$$F_{ijk} = M_{ijk} + \frac{m\lambda}{\lambda_0} H_{ijk}. \quad (3)$$

假设α,β分别是与Y坐标具有相同正负号的入射角与衍射角,r,r'为入射狭缝、探测器到点O的距离。M<sub>ijk</sub>是α,β,r,r'和光栅基底结构参数a,b,c的函数。H<sub>ijk</sub>为光栅的沟槽函数,λ<sub>0</sub>为用于记录的激光波长(取λ<sub>0</sub> = 441.6 nm),λ为指定的波长。M<sub>ijk</sub>的具体表达为<sup>[6]</sup>

$$\begin{cases} M_{000} = r + r' \\ M_{100} = -\sin \alpha - \sin \beta \\ M_{200} = T_A + T_B \\ M_{020} = S_A + S_B \\ M_{300} = \frac{T_A \sin \alpha}{r} + \frac{T_B \sin \beta}{r'} \\ M_{120} = \frac{S_A \sin \alpha}{r} + \frac{S_B \sin \beta}{r'} \\ \dots \end{cases} \quad (4)$$

### 2.2.2 全息变间距光栅记录光路光程差理论

全息光栅通过在涂有光刻胶的光栅基底上记录两束相干光的干涉条纹,经显影、刻蚀、镀膜等工艺加工而成。目前已发展出多种全息变间距光栅的记录方法,包括两球面波干涉记录和两非球面波干涉记录等。两非球面波干涉记录的变间距光栅由于具有更多可优化的记录结构参数因而更适合于对成像



### 2.3 通用全局优化算法

全局优化算法的特点是在使用迭代法时不必给出合适初始值,可以在取值范围内找出最优解。经实践,虽然这种算法并不能求解出全局最佳解,但在计算速度、结果拟合程度上优于目前常用的单一遗传算法、退火算法等。该算法可以胜任文中所需的计算。

## 3 设计结果

### 3.1 太阳极紫外成像光谱仪光学结构设计

设定太阳极紫外成像光谱仪的工作波段为 17.0~21.0 nm,光学结构设计结果如图 3 所示,结构参数如表 1 所示。望远系统采用常用的离轴抛物面结构,焦平面处设置狭缝限制系统的视场。系统一次曝光可对 0.6"×2400"的区域成像,抛物面镜绕狭缝为轴旋转以达到扫描的目的,通过扫描可对太阳某一活动区域成像。为最大限度地减小系统体积,同时使成像质量满足要求,入射光路总体成“Z”字形,取望远镜焦距  $f=1237.589$  mm,光栅放大率  $r'/r=2.78$ ,线密度设为  $2000\text{ mm}^{-1}$ , $m$  取 +1 级。通过公式  $(\sin \alpha + \sin \beta)d = \lambda$  计算,设光栅入射角度为  $3^\circ$ ,光栅到探测器的距离被设置为 2000 mm。探测器选用已制造出的背照射超薄 APS-CMOS,阵列规模为  $4096\text{ pixel} \times 3072\text{ pixel}$ ,像元尺寸为  $5\text{ }\mu\text{m} \times 5\text{ }\mu\text{m}$ , $2 \times 2$  个像元合并使用。空间方向两个探测器

合并使用以满足视场的需求<sup>[11,12]</sup>。

表 1 SEUIS 的具体结构参数

Table 1 Detailed structural parameters of SEUIS

Structural	Parameter value
Spatial resolution / (")	0.6
Spectral resolution / (nm · pixel <sup>-1</sup> )	0.00225
Entrance aperture / mm	120
Telescope focal length / mm	1237.589
Telescope decenter / mm	140
Plate scale / [ $\mu\text{m}/(")$ ]	6
Slit size / $\mu\text{m}$	$3.6 \times 11060$
Slit resolution / (")	0.6
Grating incidence angle / (°)	3
Grating entrance arm / mm	720.00
Grating exit arm / mm	2000.00
Grating constant / nm	500



图 3 SEUIS 光学系统布局

Fig. 3 SEUIS optical system layout

### 3.2 全息凹面光栅的设计

光栅设计中的关键是通过求解方程组得出可令光栅成像质量最好的结构参数与记录参数。将工作波长范围均分为  $N$  份,建立光栅像差函数

$$F = \sum_{l=1}^N \omega_l \left\{ \sum_i^4 \sum_j^4 \rho_{ij} |F_{ijl}[a, b, c, p_C, q_C, R_C, \eta_C, p_D, q_D, R_D, \eta_D, \gamma, \delta, r'(\lambda_l)]| \right\}, j = 2n, n = 0, 1, 2, \dots \quad (10)$$

其中,  $r'(\lambda_l)$  为不同波长对应的光栅中点到像面的距离,  $\omega_l$  为不同波长对应的权重因子,  $\rho_{ij}$  为不同像差项对应的权重因子。多次计算,取目标函数值较小的解,建模确定对应成像质量的好坏,根据成像质量

不断修改对应的权重  $\omega_l$  与  $\rho_{ij}$ ,然后再计算,往复循环直到得出满意的结果。为简化计算过程,先确定角度变量  $\gamma = -26.206^\circ$ ,  $\delta = 26.206^\circ$ 。所得光栅记录参数如表 2 所示。

表 2 全息光栅的具体参数

Table 2 Detailed parameters of holographic grating

Parameter	$a$ / mm	$b$ / mm	$c$ / mm	$p_C$ / mm	$p_D$ / mm	$q_C$ / mm
Before optimization	1300.125	1175.391	1173.976	327.915	498.905	324.649
After optimization	1345.617	1192.705	1194.105	334.232	443.783	316.777
Parameters	$q_D$ / mm	$R_C$ / mm	$R_D$ / mm	$\eta_C$ / (°)	$\eta_D$ / (°)	
Before optimization	431.318	-2499.133	-500.009	66.864	52.901	
After optimization	401.660	2534.947	569.025	65.641	52.508	

### 3.3 太阳极紫外成像光谱仪光学系统优化结果

利用上一步所得的光栅记录参数,在光学设计软件 Zemax 中将系统整体建模、优化,得出最终光

栅结构参数与记录参数如表 2 所示,记录光路如图 4 所示;图 5、图 6 所示分别为 SEUIS 空间方向与光谱方向均方根(RMS)半径随波长的变化曲线。

由图 6 可知,该设计中光谱范围内所有波长的 RMS 半径值均小于像元合并后总尺寸的 1/2。图 7 所示为像差最大的 17.0 nm 处的调制传递函数(MTF)

曲线。从图中可以看出,波长 17.0 nm 处各视场在特征频率 50 lp/mm 处的 MTF 均大于 0.4。以上数据表明这一设计的成像质量较好。

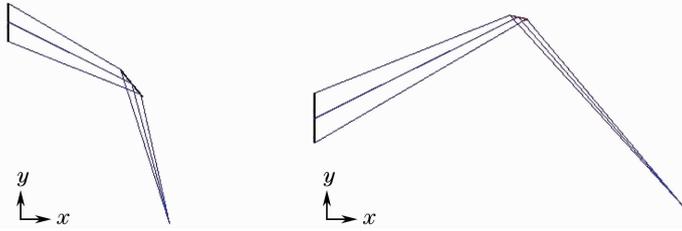


图 4 变间距光栅的记录光学结构图

Fig. 4 Schematic diagram of varied line spacing grating's recording optical system

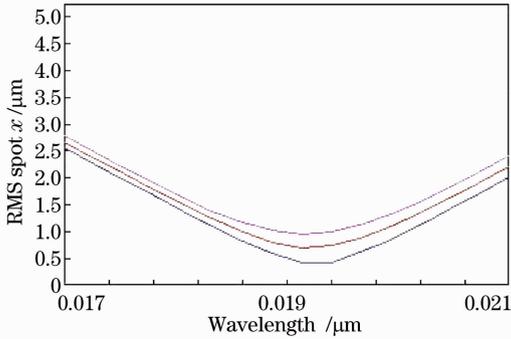


图 5 像面处空间方向 RMS 半径值随波长变化曲线

Fig. 5 Curves of RMS radius of spatial direction versus wavelength at the imaging plane

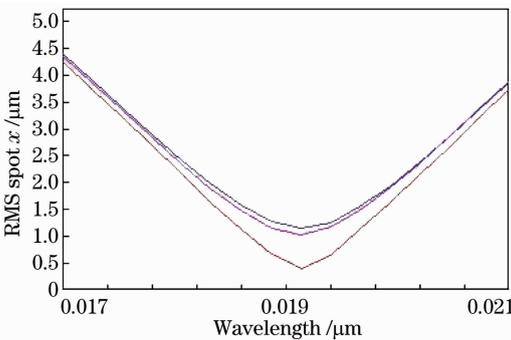


图 6 像面处光谱方向 RMS 半径值随波长变化曲线

Fig. 6 Curves of RMS radius of spectral direction versus wavelength at the imaging plane

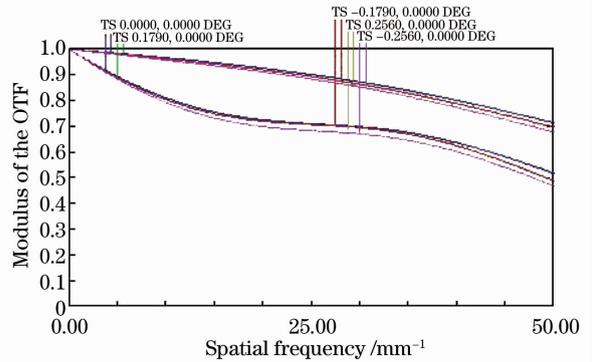


图 7 系统 17.0 nm 的 MTF 曲线

Fig. 7 MTF curves of system in 17.0 nm 仪的光学系统设计。

### 参 考 文 献

- 1 R. A. Harrison, E. C. Sawyer, M. K. Carter *et al.*. The coronal diagnostic spectrometer for the solar and heliospheric observatory[J]. *Solar Phys.*, 1995, **162**(1-2): 233~290
- 2 J. L. Culhane, L. K. Harra, A. M. James *et al.*. The EUV imaging spectrometer for Hinode [J]. *Solar Phys.*, 2007, **243**(1): 19~61
- 3 Kong Peng, Bayanheshig, Li Wenhao *et al.*. Optimization of double-grating flat-field holographic concave grating spectrograph [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(2): 0205001
- 孔 鹏, 巴音贺希格, 李文昊 等. 双光栅平场全息凹面光栅光谱仪的优化设计[J]. *光学学报*, 2011, **31**(2): 0205001
- 4 Kong Peng, Tang Yuguo, Bayanheshig *et al.*. Compensation effects between parameter errors of flat-field holographic concave gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(7): 05007001
- 孔 鹏, 唐玉国, 巴音贺希格 等. 平场全息凹面光栅结构参量误差之间的补偿作用[J]. *光学学报*, 2011, **31**(7): 05007001
- 5 Zhang Lichao. Progress in EUV multilayer coating technologies [J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2010, **3**(6): 554~565
- 张立超. 极紫外多层膜技术研究进展[J]. *中国光学与应用光学*, 2010, **3**(6): 554~565
- 6 H. Noda, T. Namioka, M. Seya. Geometric theory of the grating[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1974, **64**(8): 1031~1036
- 7 Q. Ling, G. Wu, B. Liu *et al.*. Varied line spacing plane holographic grating recorded by using uniform line spacing plane gratings[J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(21): 5059~5065
- 8 Ling Qing. Modeling and Optimization of Recording Optics for Varied Line Spacing Holographic Gratings[D]. Hefei: University

## 4 结 论

结合 SEUIS 发展的趋势,提出了一种应用全息变间距光栅的太阳光极紫外成像光谱仪的设计方法。设计了一种太阳光极紫外成像光谱仪,与已应用的太阳光极紫外成像光谱仪相比较,在视场、空间分辨率与体积方面均有所提高。将变间距光栅的记录光路设计加入整体设计中,说明了其光栅加工的可能性,同时可将记录光路的信息及时反馈到成像系统。这一方法也可用于其他极紫外波段的成像光谱仪与光谱

- of Science and Technology of China, 2006
- 凌 青. 变间距全息光栅记录光路的建模与优化[D]. 合肥: 中国科技大学, 2006
- 9 T. Namioka, M. Koike. Aspheric wave-front recording optics for holographic gratings [J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(13): 2180~2186
- 10 G. Raymond Ohl, W. Preuss, A. Sohn *et al.*. Design and fabrication of diamond machined, aspheric mirrors for ground-based, near-IR astronomy[C]. *SPIE*, 2003, **4841**: 677~688
- 11 Liu Zhuang, Gong Yan. Design of optical system for solar extreme-ultraviolet imaging spectrometer[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, **32**(3): 834~838
- 刘 壮, 巩 岩. 太阳极紫外成像光谱仪光学系统设计[J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, **32**(3): 834~838
- 12 M. Prydderch, N. Waltham, Q. Morrissey *et al.*. A large area CMOS monolithic active pixel sensor for extreme ultra violet spectroscopy and imaging[C]. *SPIE*, 2004, **5301**: 175~185

栏目编辑: 韩 峰