

文章编号: 0253-2239(2009)05-1260-04

新型衍射光学成像光谱仪的设计和分

于 斌¹ 陈丹妮¹ 孙 强² 屈军乐¹ 牛憨笨¹

(¹深圳大学光电工程学院光电子器件与系统教育部重点实验室, 广东 深圳 518060
²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)

摘要 为了克服在传统衍射光学成像光谱仪中, 衍射透镜的焦距随波长变化引起系统放大率随波长变化, 从而导致光谱图像的像元配准误差, 得到并不精确的相对光谱信号强度, 提出了将衍射透镜与消色差透镜系统相结合的新型折/衍混合、二组元复合远心成像光学系统的技术方案, 具体分析推导了该系统的成像理论。在此理论指导下, 利用光学设计软件 Zemax 设计了一套可见近红外成像光谱仪光学系统。结果表明, 不但系统的放大率不随波长变化, 而且进一步降低了衍射透镜的加工难度, 改进了衍射光学成像光谱仪的光学性能, 为新型衍射光学成像光谱仪的研制提供了重要的理论依据和设计指导。

关键词 成像系统; 成像光谱仪; 衍射光学; 光学设计

中图分类号 O436; O435.2 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS20092904.1260

Design and Analysis of New Diffractive Optic Imaging Spectrometer

Yu Bin¹ Chen Danni¹ Sun Qiang² Qu Junle¹ Niu Hanben¹

¹Key Laboratory of Optoelectronic Devices and Systems, Ministry of Education, College of Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China

²State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

Abstract To avoid the shortcoming of magnification change with wavelength, which will cause the spectral image pixel registration error and provide inaccurate relative spectral signal strength in the classical diffractive optic imaging spectrometer, a novel hybrid refraction/diffraction telecentric optical system combining a diffractive lens with an achromatic lens system is presented, and the working principle is then established. Furthermore, the concrete design example for visible/near-infrared imaging spectrometer is analyzed and evaluated with optical design software Zemax. The results prove the proposed method is valid and feasible. The shortcoming is overcome successfully, and the difficulty of the manufacturing process of the diffractive lens is also reduced. The theoretical and practical guidance is thereby provided for the study, design and engineering of the new diffractive optic imaging spectrometer with constant magnification.

Key words imaging systems; imaging spectrometer; diffraction optics; optical design

1 引 言

对成像光谱仪的研究, 已发展了多种色散型、计算层析型和干涉傅里叶变换类型的超光谱成像技术, 它们中的一些已在实际系统中得到应用^[1~6]。利用衍射透镜独特的色散特性设计出用于可见或红外光谱范围的成像光谱仪^[7], 这是衍射光学元件在

成像光谱技术上应用研究的开端。衍射光学成像光谱技术把窄带滤波技术与光谱层析技术相结合^[8~12], 采用一个衍射透镜同时完成成像和色散功能, 具有光学结构简单, 重量轻, 光通量大、信噪比高, 凝视成像、体积小、重量轻、坚固耐用、价格低廉, 便于实现小型化和轻量化等突出的优点, 是更具有

收稿日期: 2008-08-06; **收到修改稿日期:** 2008-10-07

基金项目: 国家自然科学基金(60707002)、国家 863 计划(2007AA12Z110)和深圳市科技计划项目(PT200805200255A)资助项目。

作者简介: 于 斌(1976—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事成像光谱学和超分辨成像方面的研究。E-mail: yubin@szu.edu.cn

发展潜力的新兴超光谱成像技术。

衍射透镜既是分光元件又是成像元件,衍射透镜的焦距随波长变化改变了系统的 F 数,因此改变了系统的横向放大倍率,即系统放大率是波长的函数。这将引起光谱图像的像元配准误差,得到并不精确的相对光谱信号强度,必须采取措施,补偿成像过程中的这一缺点,使不同波长的图像放大倍率相等。方法之一是^[8]对获取的不同放大率的光谱图像进行重采样,处理后得到相同放大率的图像,然后进行光谱图像重建。但这样做可能会产生新的问题,非整数像元采样会引起图像的边缘模糊,导致图像配准误差;另外一种方法为^[9~14],在系统中增加一个变焦系统,使不同波长的图像保持放大率恒定,但增加了光学系统和机械结构的复杂度。另外,在衍射透镜制作上,存在两个限制因素:衍射透镜 F 数的大小决定了其衍射结构周期及子周期的大小。F 数越小,周期及子周期越小;衍射元件的最大有效口径是又一个限制因素,口径的大小与对制作质量的要求有关。就衍射光学元件的制作来说,要制造大口径的衍射光学元件,在制版,光刻和刻蚀等道工序上都存在很多困难。基于上述基本结构设计的衍射透镜,衍射透镜的 F 数偏小,造成衍射透镜加工困难。考虑到国内衍射透镜加工工艺条件的限制因素等,设计单一的衍射透镜来实现色散和成像变得不太现实。

为了克服衍射光学成像技术中系统放大率随波长的变化问题及其衍射透镜加工难的问题,本文提出一种新型的衍射光学成像光谱仪的成像系统结构,从理论上解决了这一问题,并给出了设计公式和设计实例。结果表明该光学系统不仅结构简单,而且具有优良的超光谱成像能力和光学性能,以期待对衍射光学成像光谱仪的研制开发及应用有所裨益。

2 设计思想

根据几何光学原理^[15],由两个光组组成的复合光学系统的有效焦距 f_c ,复合系统的第一、二主面相对于光组 2 的第一、二主面间的位置 p_1, p_2 , 横向放大倍率 m 分别为

$$f_c = \frac{f_1 f_2}{f_1 + f_2 - s}, \quad (1)$$

$$p_1 = -\frac{s(f_2 - s)}{f_1 + f_2 - s}, \quad (2)$$

$$p_2 = -\frac{s f_2}{f_1 + f_2 - s}, \quad (3)$$

$$m = -\frac{f_c}{u + p_1 - f_c}, \quad (4)$$

$$v = \frac{f_c(u + p_1)}{u + p_1 - f_c} + p_2, \quad (5)$$

式中, u 为目标与光组 2 第一主面间的距离, v 为像与光组 2 第二主面间距离, f_1 为光组 1 的焦距, f_2 为光组 2 的焦距。 s 为两个光组间的间隔。在此组合系统中,令 $s = f_2$,代入公式(1~5)得

$$f_c = f_2, \quad (6)$$

$$p_1 = 0, \quad (7)$$

$$p_2 = -\frac{f_2^2}{f_1}, \quad (8)$$

$$-m = \frac{f_2}{u - f_2}, \quad (9)$$

$$v = \frac{f_2 u}{u - f_2} - \frac{f_2^2}{f_1}. \quad (10)$$

根据公式(6~10)可知,对于一个固定的透镜 f_2 ,和固定的物距 u ,像距 v 随透镜 f_1 变化,且横向放大倍率不变。因此该系统是远心系统,根据这一性质,可设计一种放大率恒定的成像系统。

采用如图 1 所示的光学系统结构,光组 1 为衍射透镜,光组 2 为一个消色差透镜,且衍射透镜位于消色差透镜 2 的前焦面上,且孔径光阑密接于衍射透镜。又由于衍射透镜 1 的焦距与波长成反比^[7]:

$$f_1(\lambda) = \frac{f_0 \lambda_0}{\lambda}, \quad (11)$$

代入公式(10)得

$$v = \frac{f_2 u}{u - f_2} - \frac{f_2^2 \lambda}{f_0 \lambda_0}. \quad (12)$$

因此,目标的像相对于透镜 2 第二主面的距离 v 依赖于波长 λ ,相反,当已知 u 和 v 时,由式(12)可求出波长 λ :

$$\lambda = \left(\frac{f_2 u}{u - f_2} - v \right) \cdot \frac{f_0 \lambda_0}{f_2^2}. \quad (13)$$

根据这一原理,通过改变探测器与透镜 2 之间的距离 v ,可设计出横向放大率恒定的衍射光学成像光谱仪。

当目标是在无限远时,即 $u = \infty$ 代入上述公式:

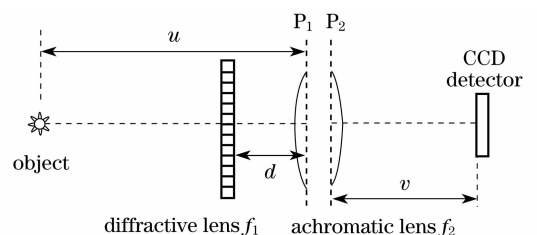


图 1 衍射光学成像光谱仪光学系统示意图
Fig. 1 Illustration of diffractive optic imaging spectrometer

$$v = f_2 - \frac{f_2^2 \lambda}{f_0 \lambda_0}, \quad (14)$$

$$\lambda = (f_2 - v) \cdot \frac{f_0 \lambda_0}{f_2^2}. \quad (15)$$

因此该系统可看作是一个由两个光组组成的复合远心光学系统,该结构补偿了衍射透镜横向放大率随波长的变化。将此组合系统沿光轴方向对所需波段的成像范围进行扫描,在各相应波长位置处由探测器获得光谱图像。由探测器接收的像是某一波长准确聚焦所成的像与其它波长在不同离焦位置所成的像的叠加。利用三维光学切片显微成像技术中的三维解卷积算法消除不需要的模糊成分,就可获取某一波长所成的像,该成像系统结构的焦距由透镜 2 决定,衍射透镜的焦距可以很大,由系统的光谱分辨率来决定。这样就降低了衍射透镜的加工难度,同时解决了衍射光学成像光谱技术中系统横向放大倍率随波长变化和衍射透镜加工难的技术问题。本成像结构可用于各种谱段的衍射光学成像光谱仪光学系统设计。

在设计含有衍射光学元件的上述光学系统时,首先考虑到国内加工衍射光学透镜的条件,根据衍射透镜的最小周期公式^[16]:

$$T = 2\lambda_0 F, \quad (16)$$

确定衍射透镜的合理设计焦距。

其次,根据旋转对称衍射透镜的衍射面相位函数^[16,17]:

$$\Phi(r) = \frac{2\pi}{\lambda_0} (A_1 r^2 + A_2 r^4 + \dots), \quad (17)$$

式中 r 为透镜在半径方向上的距离, A_1 、 A_2 ... 为衍射面形系数,若对于设计波长 λ_0 ,衍射级次为 m (不特别指明,一般取 $m=1$) 设计衍射光学元件,则其傍轴光焦度由(17)式表示的相位函数中的二次项系数 A_1 确定:

$$K_{\text{Dif}} = -2mA_1, \quad (18)$$

故 A_1 的值可由衍射透镜的光焦度确定。其他二次项系数可结合整个光学系统进行像差优化,最终确定整个光学系统的各项参数。

3 设计实例及分析

根据上述分析,以可见近红外衍射光学成像光谱仪的设计为例,考虑到国内衍射透镜加工条件,系统参数设计如下:光谱范围 $0.5 \sim 0.9 \mu\text{m}$;主设计波长 $0.6328 \mu\text{m}$;焦距 300 mm ;入瞳直径 60 mm , F 数为 5; CCD 摄像机像元尺寸 $15 \mu\text{m} \times$

$15 \mu\text{m}$,像元数 512×512 ;光谱分辨率 5 nm 左右,瞬时视场 (IFOV) 0.04 mrad ,总视场 (TFOV) $\pm 0.9^\circ$ 。利用光学设计软件 (Zemax) 的计算能力,对这个系统进行优化,最终得到各项结构参数,系统光路图和各个元件的结构参数如图 2 和表 1 所示。

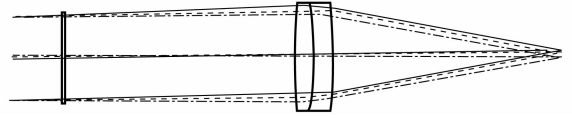


图 2 衍射光学成像光谱仪系统结构图

Fig. 2 Layout of diffractive optic imaging spectrometer

表 1 系统结构参数和材料

Table 1 Structural parameters and system materials

Surface	Radius /mm	Thickness /mm	Glass	Diameter /mm
1	∞	4	K9	30.04
2*		293.99		30
3	200.64	25	ZK8	33.22
4	-134.70	23.23	ZF3	32.17
5	-658.34	257.44	AIR	31.17

* 衍射透镜相位系数: $A_1 = -1.05 \times 10^{-4}$, $A_2 = 1.169 \times 10^{-9}$

从图 3 可见,系统在 $0.5 \sim 0.9 \mu\text{m}$ 波段内具有的轴向色散宽度大约为 12 mm ,根据需要的焦平面探测器的分辨率和变焦系统中的机械移动精度,完全可在这个色差范围内确定适合的超光谱通道数。

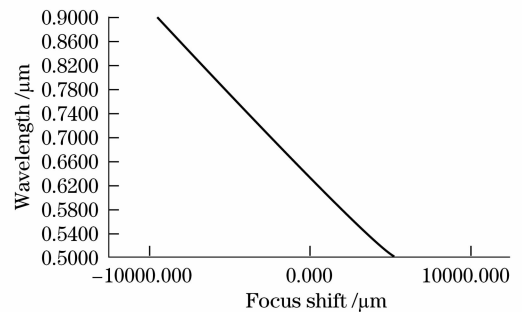


图 3 $0.5 \sim 0.9 \mu\text{m}$ 的波段范围内不同波长对应的焦点位移

Fig. 3 Chromatic focus shift of hybrid optical system in wavelength range of $0.5 \sim 0.9 \mu\text{m}$

图 4 为设计实例的调制传递函数曲线,可见空间频率为 30 lp/mm 时,调制传递函数大于 0.4,完全满足探测器对光学系统最低分辨力要求。

由图 5 可知,衍射面总的环带数为 147,最小周期线宽为 $103 \mu\text{m}$,为获得 95% 以上的衍射效率,刻蚀台阶数为 8,对应最小特征尺寸为 $12.8 \mu\text{m}$ 。这样完全可采用二元光学加工技术中的离子束刻蚀工艺加工制作该衍射透镜。

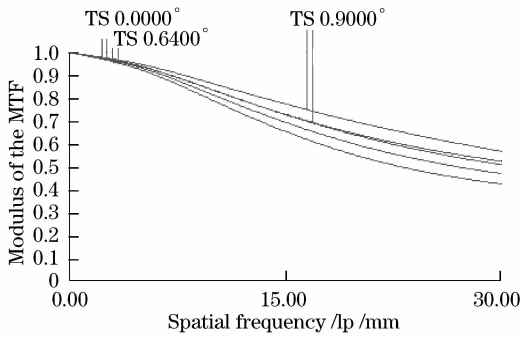


图 4 系统在设计波长 $0.6328 \mu\text{m}$ 处的光学传递函数曲线
Fig. 4 System's MTF at designed wavelength of $0.6328 \mu\text{m}$

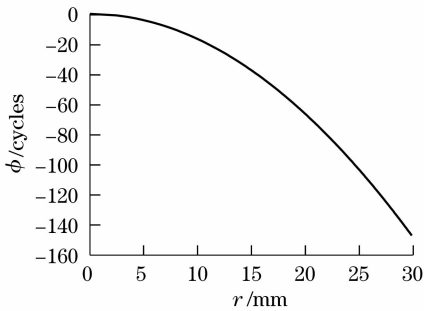


图 5 衍射透镜相位轮廓

Fig. 5 Phase of diffractive surface

4 结 论

在传统衍射光学成像光谱仪的基础上,为消除衍射光学元件作为透射式成像元件导致的焦距随波长的变化而变化,造成的像元配准误差的缺陷,提出了将衍射透镜系统与消色差透镜系统相结合组成新的远心光学系统的技术方案,解决了成像光谱仪中放大率随波长改变的缺点。设计时可适当增加衍射透镜的焦距来降低加工难度。并在此理论的指导下设计了一套可见近红外成像光谱仪光学系统,验证了这一方案的可行性。这将对衍射光学成像光谱仪的研制具有实际意义和价值。

参 考 文 献

- Wallace M. Porter, Harry T. Enmark. A system overview of the airborne visible/infrared imaging spectrometer (AVIRIS)[C]. *SPIE*, 1987, **834**:166~174
- Donald E. Rockey. High resolution imaging spectrometer (HIRIS) a major advance in imaging spectrometry[C]. *SPIE*, 1990, **1298**:93~104
- Jeff Dozier. HIRIS-the high resolution imaging spectrometer[C]. *SPIE*, 1988, **924**:23~30
- Liu Liangyun, Xiang Libin, Yang Jianfeng *et al.*. Simulation study of computed-tomography imaging spectrometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(6):805~809
- 刘良云, 相里斌, 杨建峰等. 计算层析成像光谱仪的仿真研究[J]. *光学学报*, 2000, **20**(6):805~809
- Jian Xiaohua, Zhang Chunmin, Sun Yao *et al.*. Novel polarization interference imaging spectrometer with adjustable lateral displacement savart polariscope[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(4):643~646
- 简小华, 张淳民, 孙 尧等. 一种可调横向剪切量的新型偏振干涉成像光谱仪[J]. *光学学报*, 2007, **27**(4):643~646
- He Lin, Pan Quan, Di Wei *et al.*. A small target detector based on single likelihood test for hyperspectral imagery [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(12):2155~2162
- 贺霖, 潘 泉, 邸 韡等. 一种基于单似然检验的高光谱图像小目标检测器[J]. *光学学报*, 2007, **27**(12):2155~2162
- Denise Lyons. Image spectrometry with a diffractive optic[C]. *SPIE*, 1995, **2480**:123~131
- Michele Hinrichs, Mark Massie. New approach to imaging spectroscopy using diffractive optics[C]. *SPIE*, 1997, **3118**:194~205
- Yu Bin, Yu Bingxi. Optical design for binary optic hyperspectral imager with constant magnification [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(11):1382~1386
- 于 斌, 禹秉熙. 放大率恒定的二元光学超光谱成像仪光学系统设计[J]. *光学学报*, 2002, **22**(11):1382~1386
- Yu Bin, Li Hongsheng, Yu Bingxi *et al.*. Optical design of spectrum-dividing system for binary optic hyperspectral imager [J]. *Optical Technique*, 2003, **29**(1):73~75
- 于 斌, 李宏升, 禹秉熙等. 二元光学超光谱成像仪分光系统设计[J]. *光学技术*, 2003, **29**(1):73~75
- Sun Qiang, Yu Bin, Wang Zhaoqi *et al.*. Study on hyperspectral detection system with the harmonic diffractive element in infrared dual-band[J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(3):756~761
- 孙 强, 于 斌, 王肇圻等. 谱衍射双波段红外超光谱探测系统研究[J]. *物理学报*, 2004, **53**(3):756~761
- Sun Qiang, Yu Bin, Liu Yuling *et al.*. Application of binary optical element to infrared hyperspectral detection[J]. *Science in China (Series E)*, 2003, **46**(6):654~660
- Yang Xinjun, Wang Zhaoqi, Sun Qiang *et al.*. Design of off-axial optical system for binary optic infrared imaging spectrometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(4):573~576
- 杨新军, 王肇圻, 孙 强等. 基于二元光学的红外成像光谱仪离轴系统设计[J]. *光子学报*, 2005, **34**(4):573~576
- Wu Huanbao, Wang Zhaoqi, Fu Rulian. Design of a hybrid diffractive/refractive achromatized telecentric F- θ lens system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(12):1818~1821
- 吴环宝, 王肇圻, 傅汝廉. 折/衍混合远心消色差 $f-\theta$ 物镜系统设计[J]. *光子学报*, 2005, **34**(12):1818~1821
- An Liansheng. *Applied Optics* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2003, 37
- 安连生. *应用光学* [M]. 北京:北京理工大学出版社, 2003, 37
- Jin Guofan, Yan Yingbai, Wu Minxin. *Binary Optics* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1998, 94
- 金国藩, 严瑛白, 邬敏贤. 二元光学 [M]. 北京:国防工业出版社, 1998, 94
- Leng Jiakai, Cui Qingfeng, Pei Xuedan *et al.*. Spherochromatism of hybrid diffractive refractive apochromatic telescope objectives [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5):981~987
- 冷家开, 崔庆丰, 裴雪丹等. 折衍混合复消色差望远镜中的色球差[J]. *光学学报*, 2008, **28**(5):981~987