

中红外平面光栅光谱仪系统光学设计与优化

刘 洋^{1,2}, 方勇华¹, 李大成¹, 李扬裕^{1,2}

- (1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 利用红外热电堆阵列探测器作为光接收器, 以小型化且能满足一定光谱工作范围和光谱分辨率为设计指标, 根据光谱仪设计理论和像差理论, 设计了一种 Czerny-Turner 结构中红外平面光栅光谱仪。系统采用双离轴抛物面镜作为前置光路缩减了光学系统尺寸, 采用超环面聚焦镜校正了像散。运用 ZEMAX 设计软件对中红外平面光栅光谱仪的前置光路、色散成像系统进行设计、优化和分析。最终分析结果表明, 该系统光谱工作范围为 8.04~13.96 μm , 光谱分辨率优于 80 nm, F 数为 2, 光学结构特征尺寸约为 150 mm×200 mm×70 mm, 满足设计指标。

关键词: 光学设计; 光栅光谱仪; Czerny-Turner 结构; 双离轴抛物镜; 超环面聚焦镜
中图分类号: TP702 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)02-0413-06

Optical design and optimization of a mid-infrared plane grating spectrometer system

Liu Yang^{1,2}, Fang Yonghua¹, Li Dacheng¹, Li Yangyu^{1,2}

- (1. Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Science, Hefei 230031, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Using the infrared thermopile array in the system as light receiver, with miniaturization and meet the requirements of certain spectral working range and spectral resolution as the system design task, according to the theory of spectrometer and the aberration, a mid-infrared plane grating spectrometer based on the structure of Czerny-Turner was designed. A double off-axis parabolic reflector was used as the fore-optical system to reduce the size of other optical elements, the toroidal focusing mirror was adopted to correct astigmatism. The ZEMAX software was applied to design, optimize and analyze the fore-optical system, imaging system of the spectrometer. Final analysis results show that the spectrometer system working range from 8.04 μm to 13.96 μm , spectral resolution is better than 80 nm, F number is 2, optical size of the system is 150 mm×200 mm×70 mm, and satisfy the design task.

Key words: optical design; grating spectrometer; Czerny-Turner structure; double off-axis parabolic reflector; toroidal focusing mirror

收稿日期: 2014-03-26; 修订日期: 2014-04-28

基金项目: 国家自然科学基金(41175037)

作者简介: 刘洋(1986-), 男, 博士, 主要从事光机系统设计方面的研究。Email: lyang0227@163.com

导师简介: 方勇华(1966-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事遥感光电信息技术方面的研究。Email: yhfang@aiofm.ac.cn

0 引言

光谱仪是一种分析物质化学成分及含量的重要分析仪器,在现代科学试验、生物医学、环境监测、石油化工、国防建设等领域得到极其广泛的应用^[1]。目前,在可见光、近紫外光波段的光谱仪产品已基本发展成熟,近红外波段的光谱仪器大量涌现,红外光谱仪正成为研究热点。

根据光谱仪的工作原理,可以将其分为两大类^[2]:一类是基于对光信号调制的数字变换光谱仪,如 Fourier 变换光谱仪、Hadamard 变换光谱仪;一类是基于空间色散分光的传统光谱仪,如棱镜光谱仪、光栅光谱仪等,其中光栅光谱仪相对棱镜光谱仪具有较高的光谱分辨率和信噪比。光栅光谱仪又分为曲面(凹面和凸面)光栅光谱仪和平面光栅光谱仪两大类,但是目前国内对曲面光栅的加工技术尚未成熟,且通用性不强。

常用的基于平面光栅的光谱仪系统结构有 Littrow 结构、Chupp-Gtantz 结构、Ebert-Fastie 结构和 Czerny-Turner 结构等^[2],其中 Czerny-Turner 结构平面光栅光谱仪应用最为广泛,其结构紧凑、成像质量好。因此,该系统采用 Czerny-Turner 结构进行平面光栅光谱仪系统设计。

红外热电堆阵列探测器是一种利用物质对温度的热敏特性进行红外辐射探测的室温热敏器件^[3]。其组成单元是热电偶,即连接两种不同金属材料导线的两端,形成一个回路,当两个导线端头存在一定的温差时,回路由于 Seebeck 效应就会产生温差电动势,经过处理得到端头的温度。该类探测器具有结实耐用、价格低廉、使用方便、光谱响应范围广等优点^[4]。

该系统重点利用红外热电堆探测器作为光信号接收器,以小型化、且能满足一定光谱工作范围和光谱分辨率要求为设计指标,对 Czerny-Turner 结构中红外平面光栅光谱仪系统进行参数确定、光学结构设计和优化,为小型化便携红外光谱仪的研制提供了重要的前期理论基础和设计参考。

1 理论依据

1.1 Czerny-Turner 结构工作原理

Czerny-Turner 结构如图 1 所示^[2],主要由前置

光路和色散成像系统两部分组成,前置光路包括狭缝 S、准直镜 M1;色散成像系统包括平面光栅 G、聚焦镜 M2 和探测器 D。

会聚光束穿过狭缝 S,经准直镜 M1 变成平行光束入射到平面光栅 G 上,平面光栅 G 使进入的单束平行复合光分解成多束单色光,再经过聚焦镜 M2 按照波长或波数顺序成像于探测器 D 上,探测器 D 处在聚焦镜 M2 的焦平面上;探测器 D 的作用是将接收到的光信号转换成模拟电信号,以便完成后续信号的处理和显示。

图 1 中 i 为主光线在平面光栅上的入射角, θ 为中心波长的衍射角, f_1 和 α_1 为准直镜 M1 的焦距和离轴角, f_2 和 α_2 为聚焦镜 M2 的焦距和离轴角。

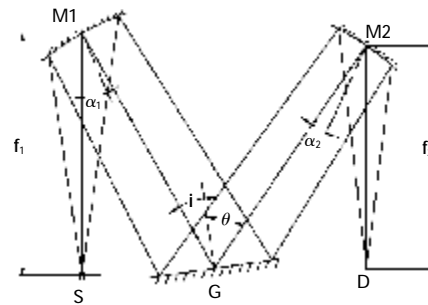


图 1 Czerny-Turner 结构示意图

Fig.1 Czerny-Turner structure

1.2 Czerny-Turner 结构的像差及其校正

光谱仪系统像差的存在降低了系统的光谱分辨率,也容易产生假谱线,必须对像差进行分析校正。像差可以分为单色像差和色差^[5],由于 Czerny-Turner 结构处在全反射条件下使用,系统中只存在单色像差,包括球差、彗差、像散、场曲和畸变,在此仅对影响系统较大的球差、彗差和像散进行分析校正。

球差使谱线双向对称扩散,直接影响光谱分辨率,根据瑞利准则,球差应校正到满足

$$f \leq 256\lambda (F\#)^4 \quad (1)$$

式中: f 为成像反射镜的焦距; $F\#$ 为光学系统的 F 数。

彗差是由系统处在离轴条件下时产生,彗差使谱线单向扩散。在非交叉式 Czerny-Turner 结构中,根据 Shafer 等式^[5],当图 1 中所示结构参数满足

$$\frac{\sin \alpha_2}{\sin \alpha_1} = \frac{\gamma_2^2}{\gamma_1^2} \left(\frac{\cos i}{\cos \lambda} \right)^3 \left(\frac{\cos \alpha_2}{\cos \alpha_1} \right)^3 \quad (2)$$

时,中心波长处的彗差就可以得到校正。

像散对 Czerny-Turner 结构的像质影响最大,像

散的产生是因为聚焦镜子午面和弧矢面曲率半径相同,而在离轴成像时子午焦面和弧矢焦面距离不等,因此需要校正。

2010 年, Kye-Sung Lee^[6]等已证实采用柱面镜可校正像散,但是透射式柱面镜导致系统能量降低,而且会产生色差;2002 年, Masayuki Futamata^[7]等采用超环面聚焦镜很好地校正了系统像散,且从薛庆生等^[8]设计的宽波段成像光谱仪中得到证实。

2 光学系统参数的确定

光栅光谱仪系统主要包括前置光路和色散成像系统,由平面光栅、准直镜、聚焦镜和狭缝构成^[2]。根据系统设计参考指标(见表 1)及光学设计理论,首先确定色散成像系统的光学参数,然后通过远心匹配原则确定前置光路的光学参数^[9]。

表 1 中红外平面光栅光谱仪系统设计参考指标

Tab.1 Design reference task of mid-infrared plane grating spectrometer system

Item	Parameters
Spectral range	8-14 μm
Spectral resolution δλ	≤ 80 nm
F #	≤ 2
Aperture diameter D	< 55 mm
Spectrum width L	38 mm
Active area per pixel	0.45 mm×1.5 mm
Pixel pitch p	0.5 mm

2.1 光栅参数的确定

光栅是光谱仪系统的核心色散元件,不仅决定了光谱仪的波段范围,还直接影响系统的光谱分辨率。光栅参数是由光谱仪的波段范围和设计要求的分辨率确定的。光栅参数主要包括光栅常数 d 和总刻线数 N。

2.1.1 光栅常数

根据光栅方程和限制条件来确定平面光栅常数 d

$$d(\sin i + \sin \theta) = k\lambda \quad (3)$$

$$|\sin i + \sin \theta| \leq 2 \quad (4)$$

将(4)式代入(3)式,有

$$k \leq 2d/\lambda \quad (5)$$

满足(5)式时, k 为观察某一中心波长 λ 光谱的最佳级次。

2.1.2 总刻线数 N

光栅刻线多少直接影响系统的光谱分辨率。总刻线多,光谱分辨率就高;总刻线少,光谱覆盖范围就宽。

根据系统分辨能力公式

$$R = \lambda / (\delta\lambda) = kN \quad (6)$$

式中: R 为系统分辨能力; δλ 为系统光谱分辨率。

取入射角 i=0, 光栅衍射级次 k=1, 中心波长 λ=10.6 μm, 可得平面光栅的刻线数为 50 lp/mm, 取总刻线数 N=1 500, 即平面光栅大小为 30 mm×30 mm。

2.2 聚焦镜和准直镜参数的确定

2.2.1 聚焦镜

聚焦镜参数的确定关系到光学系统与红外热电堆阵列探测器的匹配,其作用是将狭缝的像成像于红外热电堆阵列探测器的探测像元上,且要保证能完整分辨,因此,光谱宽度与红外热电堆阵列探测器探测像元空间宽度要满足一定的关系^[10],如图 2 所示。

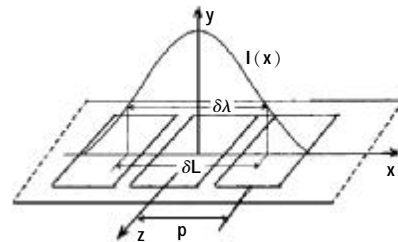


图 2 阵列探测器获取光谱示意图

Fig.2 Diagram of infrared thermopile array capture spectrum

由图 2 可知:光谱宽度 δλ 与红外热电堆阵列探测器探测像元空间宽度 δL 的关系满足

$$np = \delta L = \frac{dl}{d\lambda} \delta\lambda \quad (7)$$

式中: dl/dλ 为仪器的线色散率。

$$\frac{dl}{d\lambda} = \frac{k}{d \cos \theta} \frac{f_2}{\cos \sigma} \quad (8)$$

式中: n 为一个光谱宽度所占的像元数; p 为探测像元中心距; σ 为聚焦镜焦面相对垂直平面的倾角。

将(8)式代入(7)式,有

$$np = \delta L = \frac{kf_2}{d \cos \theta \cos \sigma} \delta\lambda \quad (9)$$

在近场、像差矫正较好的情况下,可认为(9)式中 σ=0, 有

$$np = \delta L = \frac{kf_2}{d \cos \theta} \delta\lambda \quad (10)$$

2.2.2 准直镜

准直镜的参数需根据方案的选择、系统设计指标及成像系统远心匹配原则共同确定^[9]。

系统设计目标是一个红外热电堆阵列探测器像元探测一个光谱宽度,所以 $\delta L=p$, 仍取入射角 $i=0$, 联立式(3)、(10), 可得 $f_2=105.994\ 4\ \text{mm}$, 又知 $F\#=2$, 所以聚焦镜的有效直径 $D_2=52.997\ 2\ \text{mm}$, 又知入射孔径 $D<55\ \text{mm}$, 所以准直镜参数与聚焦镜的参数相接近。

2.3 狭缝的尺寸的确定

2.3.1 狭缝宽度 W

系统光谱分辨率的高低与狭缝的尺寸有密切关系,狭缝越窄,光谱分辨率越高,但是系统能接收到的光能量就越低,因此,必须在保证足够光能量的前提下,选择合适的狭缝。

狭缝像的宽度是由几何放大和衍射两部分组成,可用式(11)表示。

$$W' = \frac{\cos i}{\cos \theta} \frac{f_2}{f_1} W + \frac{\lambda}{D} f_2 \quad (11)$$

式中: W 为狭缝宽度; W' 为狭缝像宽度; D 为平面光栅有效直径(近似与准直镜直径相等)。

2.3.2 狭缝高度 H

入射狭缝的像高只取决于几何放大,即

$$H' = f_1/f_2 H \quad (12)$$

由光谱带宽的定义,在理想情况下,狭缝的像宽等于红外热电堆阵列探测器像元的宽度,即 $W'=0.45\ \text{mm}$, 由(11)式和(12)式,有

$$W=363.603\ 4\ \mu\text{m}, H=1\ 500\ \mu\text{m}$$

所以狭缝尺寸为 $363.6\ \mu\text{m} \times 1\ 500\ \mu\text{m}$ 。

因此,最终得到的平面光栅光谱仪光学系统参数,如表 2 所示。

表 2 平面光栅光谱仪光学系统参数

Tab.2 Optical parameters of plane grating spectrometer system

	Item	Parameters
Grating	Grooves	50 lp/mm
	Size	30 mm×30 mm
	Blaze wavelength	10.6 μm
Collimating mirror	Focal length f_1	105.99 mm
	F#	2
Focusing mirror	Focal length f_2	105.99 mm
	F#	2
Slit	Wide×Height	364 $\mu\text{m} \times 1\ 500\ \mu\text{m}$

3 光学系统方案设计

分光成像系统选择全反射式,该系统具有不受材料透过率的限制、光能量高且不存在色差等优点^[2],下面分别根据光学系统的参数对前置光路和色散成像系统进行方案设计选择。

3.1 前置光路方案设计及选择

前置光路的作用是将目标成像在入射狭缝上,并经过狭缝形成平行光。目前,常用的前置光路有离轴三反式、卡塞格林式^[11]和双离轴抛物镜式^[12]。其中,离轴三反式结构复杂,不利于装调;因此考虑用卡塞格林式结构和双离轴抛物镜式结构,分别对两种结构方案进行设计、选择。

(1) 卡塞格林式前置光路

采用经典卡塞格林系统,由主镜和副镜组成。主镜是抛物面;副镜是双曲面。设计结构及参数分别如图 3 和表 3 所示。

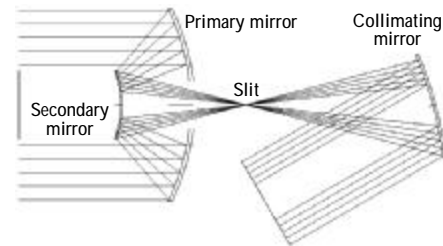


图 3 卡塞格林式前置光路图

Fig.3 Layout of Cassegrain-type fore-optical path

表 3 卡塞格林式系统光学参数

Tab.3 Parameters of Cassegrain

Surface	Radius of curvature /mm	Diameter /mm	Conic
Primary mirror	-60	55	-1
Secondary mirror	-27.692	20	-3.313

优缺点:结构比较繁杂,存在遮拦,大大降低了能量利用率,装调困难。

(2) 双离轴抛物镜式前置光路

通常,在此种前置光路中两个离轴抛物镜的口径是一样大小^[12],为了缩小系统总体结构尺寸,在保证 F 数不变的情况下,将第二个离轴抛物镜的口径缩小为原来口径的 $1/2$,得到结构如图 4 所示,参数如表 4 所示。

优缺点:结构简单,尺寸小,能量利用率高;装调较困难。综合考虑,选择双离轴抛物镜式前置光路。

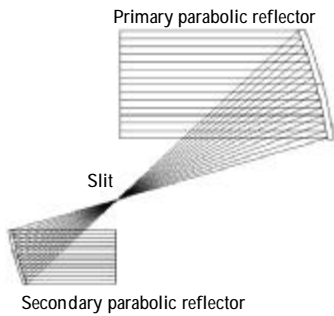


图 4 双离轴抛物镜式前置光路图

Fig.4 Layout of double off-axis parabolic reflector optical path

表 4 双离轴抛物镜式系统光学参数

Tab.4 Parameters of double off-axis parabolic reflector

Surface	Angle of off-axis /($^{\circ}$)	Diameter /mm	Conic
Primary parabolic reflector	30	50.8	-1
Secondary parabolic reflector	30	25.4	-1

3.2 色散成像系统方案设计及选择

根据像差理论,加入超环面聚焦镜消除像散^[7-8],对交叉 Czerny-Turner 结构和非交叉 Czerny-Turner 结构分别设计优化。

(1) 交叉 Czerny-Turner 结构

优缺点:在短波长处波长分开不明显,结构紧凑;不利于实验的装调。如图 5 所示。

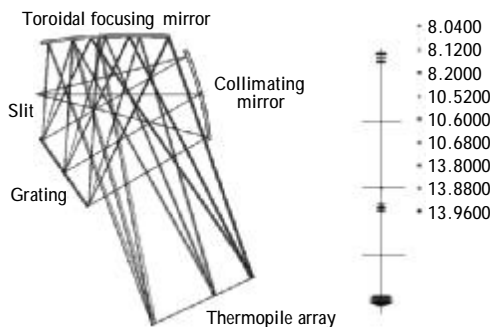


图 5 交叉 Czerny-Turner 结构和部分波长点阵图

Fig.5 Crossed Czerny-Turner structure and spot diagram of part wavelength

(2) 非交叉 Czerny-Turner 结构

优缺点:波长分开较明显,结构相对分散,利于装调。综合考虑,笔者选用非交叉 Czerny-Turner 结

构色散成像系统。如图 6 所示。

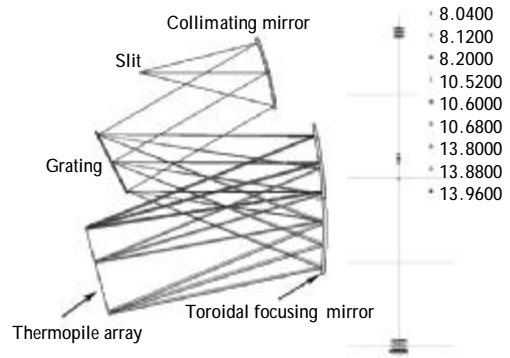


图 6 非交叉 Czerny-Turner 结构和部分波长点阵图

Fig.6 Non-crossed Czerny-Turner structure and spot diagram of part wavelength

4 系统模拟与结果分析

4.1 ZEMAX 中系统模拟与优化

系统设计方案确定之后,在 ZEMAX 光学设计软件中将双离轴抛物镜式前置光路和非交叉 Czerny-Turner 结构色散成像系统合二为一进行最后微调优化,最终得到满足系统设计指标的光谱仪光学系统,如图 7 所示。

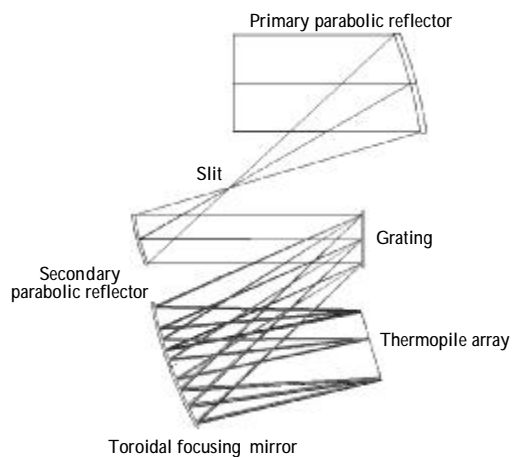


图 7 优化后的中红外平面光栅光谱仪光学系统

Fig.7 Optical path of mid-infrared plane grating spectrometer system after optimizing

4.2 结果分析

基于红外热电堆阵列探测器的中红外平面光栅光谱仪光学系统由双离轴抛物镜、狭缝、平面光栅、超环面聚焦镜组成。优化后系统波长范围为 8.04 ~ 13.96 μm ,狭缝尺寸为 120 μm ×700 μm ,视场角为

0.048°×0.34°, 光学结构特征尺寸约为 150 mm×200 mm×70 mm, 谱面宽度为 38.2 mm, 波长分开很明显, 彗差基本校正, 系统的像散也大大减小, 如图 8 所示, 分别取 8.12 μm、10.6 μm 和 13.88 μm 附近波长的点列图进行分析, 可以看出设计的光学系统可以分辨出波长间隔 80 nm 的波长。

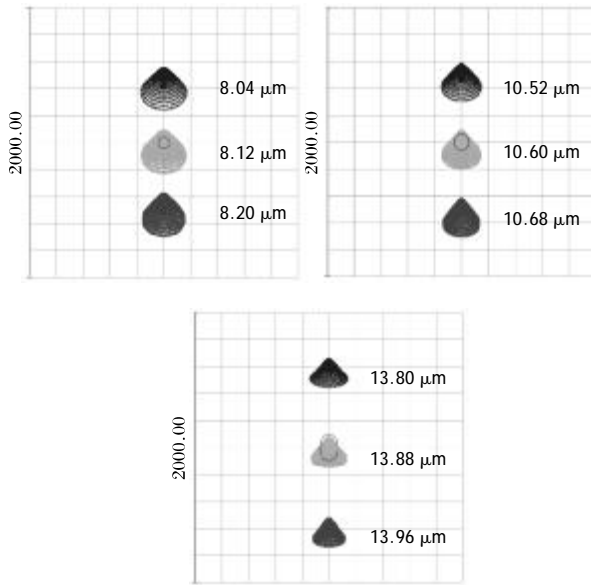


图 8 部分波长点列图

Fig.8 Spot diagram of part wavelength

5 结论

以红外光谱仪的光谱工作范围、光谱分辨率为设计指标, 利用红外热电堆阵列探测器作为光信号接收器件, 设计了一种 Czerny-Turner 结构中红外平面光栅光谱仪, 系统由双离轴抛物镜、狭缝、平面光栅、超环面聚焦镜组成。线外热电堆阵列探测器的使用替代了光谱动态扫描, 大大提高了系统的可靠性和响应速度; 使用双离轴抛物镜作为前置准直光路, 光束经过无焦系统后, 口径降低为原来的 1/2, 有效减小了后部分光学元件的尺寸, 同时使用超环面聚焦镜减小了系统的像散。利用 ZEMAX 光学设计软件对仪器的前置光路、色散成像系统进行了设计、优化和分析。最终分析结果表明, 该光学系统光谱工作范围、光谱分辨率、谱面展宽、光学系统结构尺寸等参数性能良好。

光谱仪的光谱工作范围处在红外波段, 杂散光对此波段范围内的光信号提取有较大的干扰, 下一步工作会对系统的杂散光进行深层次的研究分析和

抑制, 以使基于线外热电堆阵列探测器的中红外平面光栅光谱仪系统性能更加可靠。

参考文献:

- [1] Lin Xuling, Zhou Feng, Wang Huaiyi, et al. Spatially modulated interference imaging spectrometer based on Wollaston prisms[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(7): 1798-1802. (in Chinese)
- [2] Li Quanchen, Jiang Yuejuan. *The Spectral Instrument*[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1999. (in Chinese)
- [3] Liu Linhua, Luo Haosu, Wu Xiao, et al. Novel pyroelectric materials and their applications in high performance infrared devices [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(5): 777-785. (in Chinese)
- [4] Ye Yutang, Liu Shuang. *Infrared and Low Light Level Technology* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010. (in Chinese)
- [5] Arthur B Shafer, Lawrence R Megill, Leann Droppelman. Optimization of the czerny-turner spectrometer [J]. *Optical Society of America*, 1964, 54(7): 879-887.
- [6] Kye-Sung Lee, Kecin P Thompson, Jannick P Rolland. Broadband astigmatism-corrected Czerny-Turner spectrometer[J]. *Opt Express*, 2010, 18(22): 23378-23384.
- [7] Masayuki Futamata, Takehiko Takenouchi, Kei-ichi Katakura. Highly efficient and aberration-corrected spectrometer for advanced Raman spectroscopy[J]. *Appl Opt*, 2002, 41(22): 24-31.
- [8] Xue Qingsheng, Wang Shurong, Lu Fengqin. Aberration-corrected czerny-turner imaging spectrometer carried by satellite [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(1): 35-40. (in Chinese)
- [9] Gong Guangbiao, Ji Yiqun, Zhu Shanbing, et al. Design of a fore-optical objective with large relative aperture for spectral imagers [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(5): 889-892. (in Chinese)
- [10] Chen Weimin, Hu Song, Wen Zhiyu. The theoretical study on the spectral width and resolution of the mini-spectrometer [J]. *Piezoelectrics and Acousto-optics*, 2000, 22(3): 149-151. (in Chinese)
- [11] Shang Yang. Research of noise reduction technique in imaging spectrometer with grating dispersion [D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2012. (in Chinese)
- [12] Li Hua, Xing Tingwen, Ma Wenli. A far infrared spectrometer using grating as splitting elements [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2002, 29(3): 43-46. (in Chinese)