

Offner 型消热差中波红外成像光谱仪设计

罗刚银, 王弼陡, 陈玉琦, 赵义龙

(中国科学院苏州生物医学工程技术研究所 中国科学院生物医学检验技术重点实验室, 江苏 苏州 215163)

摘要: 为了满足中波红外光谱分析的需要, 设计了 Offner 型中波红外成像光谱仪。在分析红外系统消热差方程的基础上, 明确通过选择不同热特性材料的合理组合可以设计出合理的消热差光学结构; 在分析 Offner 结构原理的基础上, 建立了一种简化的初始结构求解过程以及采用光学仿真软件进行优化的设计方法。最后, 利用该方法设计了工作波段为 3~5 μm 的推扫式成像光谱仪, 并进行了一体化消热差设计, 工作温度范围为 -40~100 $^{\circ}\text{C}$, 全视场范围内的弥散斑小于 30 μm , 调制传递函数值在空间截止频率 16.7 lp/mm 处均大于 0.35, 光谱分辨率小于 15.6 nm, 具有较好的光谱分光性能。

关键词: 光学设计; 消热差; Offner; 中波红外

中图分类号: TH744.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.1104004

Design of athermal mid-infrared imaging spectrometer based on Offner scheme

Luo Gangyin, Wang Bidou, Chen Yuqi, Zhao Yilong

(Key Lab of Bio-Medical Diagnostics, Chinese Academy of Sciences, Suzhou Institute of Biomedical Engineering and Technology, Chinese Academy of Sciences, Suzhou 215163, China)

Abstract: An athermal mid-infrared imaging spectrometer based on the Offner scheme was designed to meet the requirement of mid-infrared spectrum analysis. According to the solution of the athermal equations, athermal structure could be designed reasonably through reasonable combination of materials with different thermal properties. Method of solving the initial structure and optical software optimization was introduced based on the analysis of Offner structure principle. A push broom imaging spectrometer with 3–5 μm spectral range was designed by this method, and its operating temperature range is from -40 $^{\circ}\text{C}$ to 100 $^{\circ}\text{C}$ depending on the achromatic optimization. The spectrometer has good spectral performances, the dispersion spot diameter of which is less than 30 μm in the full field of view. The spectrometer's transfer function value is greater than 0.35 at the spatial cutoff frequency of 16.7 lp/mm, and its spectral resolution is less than 15.6 nm.

Key words: optical design; athermal; Offner; mid-infrared

收稿日期: 2017-03-10; 修订日期: 2017-04-15

基金项目: 国家重大科研装备研制项目(ZDYZ2013-1); 国家高技术研究发展计划(2014AA020905)

作者简介: 罗刚银(1984-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事光谱技术方面的研究。Email: luogy1237@sina.com

0 引言

成像光谱仪是光谱分析的重要设备,它能够在连续光谱段上对同一目标同时成像,可直接反映被分析目标的光谱特征,在物质成分分析、环境污染检测、土地资源分析、植被分类测绘、地质矿产调查、海洋生态研究、大气探测和军事遥感等多个领域有着重要的用途^[1-3]。成像光谱仪的工作波段主要有可见光、近红外、短波红外、中波红外和长波红外等,其中中波红外波段不仅可用于物质成分的透射光谱分析^[4],而且还可用于飞机喷气气流、爆炸气体等高温物体的辐射光谱分析^[5],因此研究中波红外成像光谱仪具有重要的意义。

中波红外成像光谱仪的分光结构包括傅里叶干涉分光、棱镜分光、滤光片分光和光栅分光等多种形式。1998年,美国 Surface Optics 公司研制了傅里叶干涉分光的红外光谱仪^[6],而傅里叶干涉分光结构形式也是目前科研领域中使用的红外光谱仪最成熟的结构形式。2002年,美国 EN'URGA 公司研制了氟化钙棱镜分光的红外光谱仪^[7];Wilks 公司研制了可变滤波器阵列分光的便携式中波红外光谱仪^[8]。2010年,刘英等人^[9]利用谐衍射元件独特的色散特性,将谐衍射透镜应用于中、长波红外成像光谱系统。2012年,兰卫华等人^[10]利用窄带滤光片和面阵探测器技术,构建了基于时序扫描的凝视成像型中波红外多光谱成像系统;程欣等人^[11]采用 Dyson 同心结构设计了凹面光栅机载双波段成像光谱仪,工作波段为可见近红外和中波红外波段。2013年, Spectro 公司采用凹面光栅色散、固态波导的结构形式设计了结构紧凑的中波红外光谱仪^[12]。2014年,肖喜中等人^[5]采用滤光片和中波面阵探测器设计了四通道中波多光谱红外成像仪,实现了飞机红外光谱辐射特性的多光谱测量;韩顺利等人^[13]提出了一种基于波段拓展的红外多光谱成像的方法,利用中波红外热像仪采集红外图像,通过目标表面的真实红外辐射反推出热图像中不同像素点的温度值,然后利用普朗克公式可以获得不同像素点在预拓展波段处的辐射出射度数值,最后根据这些数值进行红外多光谱成像。2015年,张浩等人^[14]采用 Offner 结构设计了光栅分光中长波红外双衍射级次共路光谱仪,着重

研究了一级衍射光和二级衍射光在 Offner 机构中完全重叠共路传输。2016年,R.V.Skidanov 等人^[15]研究了工作于可见与中波红外双波段的 Offner 分光系统,着重解决了该光栅分光系统中高级像差的校正问题。目前,很少有人系统地研究中波红外成像光谱仪的设计方法,且研制的红外光谱分析系统很少考虑消色差的问题。

由于 Offner 结构具有谱线弯曲和色畸变小、结构简单、无移动部件等优点,文中将采用该结构设计中波红外成像光谱仪的分光系统,同时考虑成像光谱仪的消热差设计。另外,采用一种简化的 Offner 初始结构求解方法,并配合光学仿真软件完成 Offner 分光系统的优化设计。

1 设计思想

1.1 结构形式

中波红外成像光谱仪主要由前置镜头、分光系统和红外探测器组成,整个系统采用推扫式工作方式。前置镜头将分析目标成像在光谱仪的入射狭缝上,经过分光系统之后实现光谱分光,所成的光谱像被红外探测器所接收。当光谱仪随着运动机构做推扫时,将形成分析目标光谱信息的数据立方,而通过数据立方可以得到分析目标上任何一点的光谱曲线,如图 1 所示,其中 λ 为光谱维方向, x 为成像维方向, y 为光谱仪的推扫方向。

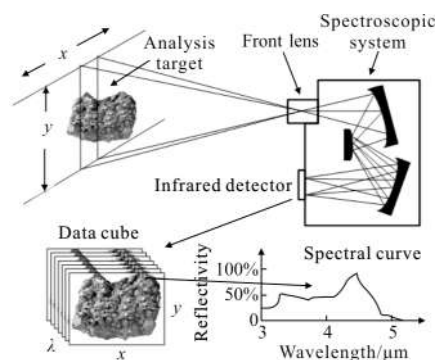


图 1 中波红外成像光谱仪结构原理

Fig.1 Principle of mid-infrared imaging spectrometer structure

1.2 消热差原理

环境温度的变化会引起红外光学系统性能的降低,主要因为温度会引起光学材料的折射率变化(由红外光学材料的温度系数变化引起)、引起光学元件

曲率半径和中心厚度变化 (由红外光学材料的热膨胀系数引起)、引起光学系统中光学元件的间隔变化 (由镜筒等结构件材料的热膨胀系数引起)^[16]。因此,为使红外光学系统在较宽的温度范围内具有较稳定的光学性能,需要对其进行消热差设计。目前,常见的消热差设计方法主要有电子主动式、机械被动式和光学被动式三种^[17-18],其中光学被动式具有不引入额外的电子机械装置、结构简单、体积较小等优点,因此文中采用该方法进行消热差设计。

在进行光学被动式消热差设计时,光学系统需要满足总光焦度分配、消色差、消热差三个方程^[19]:

$$\sum_{i=1}^k h_i \phi_i = \phi \quad (1)$$

$$\left(\frac{1}{h_1 \phi}\right)^2 \sum_{i=1}^k (h_i^2 C_i \phi_i) = 0 \quad (2)$$

$$\left(\frac{1}{h_1 \phi}\right)^2 \sum_{i=1}^k (h_i^2 T_i \phi_i) + a_h L = 0 \quad (3)$$

式中: ϕ 、 ϕ_i 分别为系统的总光焦度、第*i*个透镜的光焦度; h_i 为第一近轴光线在第*i*个透镜入射面的高度; C_i 、 T_i 分别为第*i*个透镜的色差系数和热差系数; a_h 为镜筒材料的热膨胀系数; L 为镜筒的长度。可见,要用光学被动式技术实现镜头消热差,即满足上述三个方程得到一个确定解,就需要三种不同材料^[20],且三种材料的阿贝数应该差别较大,热膨胀系数较小;同时考虑镜筒材料的热特性,通过选择不同热特性材料的合理组合,设计出合理的消热差光学结构来消除或减小温度影响。

1.3 Offner 分光原理

Offner 结构分光系统是由两个凹面反射镜 (主镜、次镜) 和一个凸面光栅组成,凸面光栅位于两个凹面反射镜之间,所有反射球面的球心均位于同一点。Offner 结构是一种对称的结构形式,其像面倾斜和畸变会自动抵消。同时,Offner 结构又是一种同心分光结构,三个光学元件的球面必须满足罗兰圆结构和共球心要求,从而消除了彗差。由于系统中的光学元件全为反射形式,不存在色差问题。可见,Offner 分光结构具有像差小的突出优点。

已有的参考文献主要针对如何消除 Offner 分光系统中的像散进行分析,通过子午面内的像点与弧矢面内的像点重合列出系统的消像散方程,进而解出系统的各个结构参数^[21]。该方法计算过程较为繁

琐,因此文中采用一种较为简单的初始结构求解方法,并借助 ZEMAX 光学仿真软件的优化功能来完成 Offner 分光结构的优化设计。

Offner 结构原理如图 2 所示,其中 Primary 为主镜,Grating 为光栅,Tertiary 为次镜,A 为入射狭缝位置,C 为入射主光线与主镜的交点,D 为入射主光线与光栅的交点,B 为衍射主光线与次镜的交点,为衍射主光线与光谱像面的交点。为确定 Offner 的初始结构,需要确定的参数包括入射光入射高度 H_1 、主镜倾斜角 θ_1 、次镜倾斜角 φ_1 、主光线入射角 θ 、主光线衍射角 φ 、衍射光出射高度 H_2 、主镜半径 R_1 、凸面光栅半径 R_2 、凸面光栅刻线密度 g 、次镜半径 R_3 。另外,需要确定的参数还包括光栅衍射级次 m 、工作波长范围 $\Delta\lambda$ 、中心工作波长 λ_c 、探测像素尺寸 δ 、探测光谱维宽度 h 、探测成像维长度 l 、光谱分辨率 δ_λ 等。

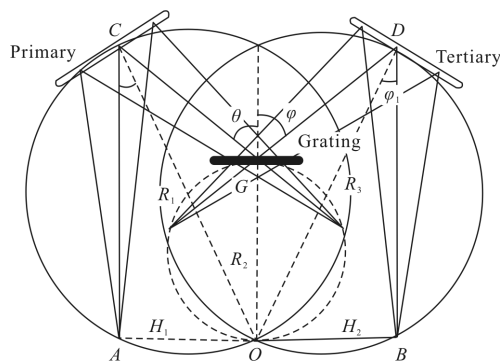


图 2 Offner 结构原理

Fig.2 Offner structure principle

光栅曲率半径 R_2 为:

$$R_2 = \frac{h}{mg\Delta\lambda} \quad (4)$$

为简化设计,假设整个系统 1:1 成像,则:

$$R_1 = R_3 = 2R_2 \quad (5)$$

光栅衍射方程为:

$$\sin\varphi - \sin\theta = m\lambda_c \quad (6)$$

主镜倾斜角 θ_1 为:

$$\theta_1 = \frac{\theta}{2} \quad (7)$$

次镜倾斜角 φ_1 为:

$$\varphi_1 = \frac{\varphi}{2} \quad (8)$$

入射光入射高度 H_1 为:

$$H_1 = \sin\theta_1 \cdot R_1 \quad (9)$$

入射光出射高度 H_2 为:

$$H_2 = \sin \varphi_1 \cdot R_3 \quad (10)$$

系统的光谱分辨率 δ_λ 为:

$$\delta_\lambda = \frac{\delta}{gmR_2} \quad (11)$$

综上所述, Offner 的初始结构可以按照图 3 所示的求解流程确定。

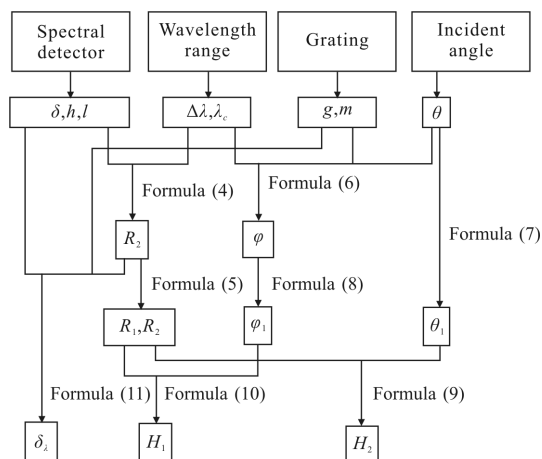


图 3 Offner 初始结构求解流程

Fig.3 Solution procedure of initial Offner structure

在确定好 Offner 初始结构之后, 将初始结构参数输入 ZEMAX 光学仿真软件中, 通过以下操作完成初始结构的优化设计。

- (1) 手动调整初始结构的参数使中心波长的衍射光与次镜的中心相交;
- (2) 中心波长的衍射光经次镜反射后与光轴平行;
- (3) 主镜和次镜适当离轴以平衡像差;
- (4) 像面适当倾斜以平衡各波段的像差;
- (5) 采用 CVGT、CVLT、PnGT、PnLT、CTGT、CTLT 等优化操作数限制初始结构中各参数的变化范围, 对 Offner 初始结构进行自动优化。

1.4 前置镜头设计

前置镜头将分析目标成像在入射狭缝处, 当分光系统 1:1 成像时, 狭缝长度等于探测成像维长度 l , 狭缝宽度等于探测像素尺寸 δ 。

前置镜头的成像维视场角 ω_l 与焦距 f 的关系为:

$$\omega_l = 2\arctan\left(\frac{l}{2f}\right) \quad (12)$$

前置镜头的光谱维视场角 ω_δ 与焦距 f 的关系为:

$$\omega_\delta = 2\arctan\left(\frac{\delta}{2f}\right) \quad (13)$$

2 参数指标

设计的中波红外成像光谱仪的工作波长范围为 3~5 μm 。选择 320×256 像素的碲镉汞红外探测器, 像素尺寸为 15 μm , 则光谱维宽度为 3.84 mm, 成像维长度为 4.8 mm。采用两个像素单元合并的方式作为实际工作像素, 则工作像素尺寸为 30 μm , 光谱维为 128 通道, 由 1/2 δ 可得系统的空间截止频率为 16.7 lp/mm。选择入射狭缝的宽度与工作像素尺寸相等为 30 μm , 入射狭缝长度与探测器成像维长度相等为 4.8 mm, 同时选择前置镜头的焦距为 20 mm, 像方 $F\#$ 为 5, 由公式(11)、公式(12)可得成像维视场角为 13.8°, 光谱维视场角为 0.1°。选择光栅刻线密度 40 lines/mm, 光栅衍射级次+1 级, 由公式(12)可得光谱分辨率为 15.6 nm。另外, 设计光谱仪的工作温度范围为 -40~100 °C。因此, 系统参数指标如表 1 所示。

表 1 系统参数指标

Tab.1 System parameter requirements

Parameter	Value
Spectral wavelength/ μm	3-5
Pixel size/ μm	30
Spectral width/mm	3.84
Image length/mm	4.8
Slit length/mm	4.8
Slit width/ μm	30
Grating density/lines·mm ⁻¹	40
Grating order	+1
Focal length/mm	20
F number	5
Field angle/(°)	13.8×0.1
Spectral resolution/nm	15.6
Temperature range/°C	-40-100

3 光学设计

3.1 前置镜头设计

为实现前置镜头消色差和较为稳定的温度特

性,选择阿贝数大而热膨胀系数小的玻璃材料组合设计前置镜头的初始结构,最终选择 Si、Ge 和 ZnSe 三种玻璃材料组合为四片式结构。按照表 1 的参数指标设计在常温(20°)条件下工作的前置镜头结构如图 4 所示,玻璃材料依次为 Si、Ge、ZnSe、Si,优化后该前置镜头的全视场弥散斑均小于 4 μm,在空间截止频率 16.7 lp/mm 处的传递函数值大于 0.55,具有良好的光学性能。

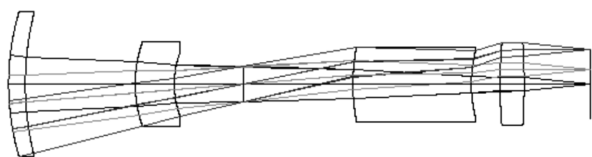


图 4 前置镜头结构
Fig.4 Front lens structure

3.2 分光系统设计

按照表 1 选择的工作波长范围、光栅和探测器的参数,以及图 3 所示的求解过程,选择主光线入射角为 30°,计算得到 Offner 初始结构的参数如表 2 所示。

表 2 Offner 初始结构参数

Tab.2 Initial structure parameters of Offner

Parameter	Value
$\theta/(\text{°})$	30
$\varphi/(\text{°})$	41.3
$\theta_1/(\text{°})$	15
$\varphi_1/(\text{°})$	20.65
R_2/mm	48
$R_1, R_3/\text{mm}$	96
H_1/mm	24.85
H_2/mm	33.86

将 Offner 初始结构的参数输入 ZEMAX 光仿真软件中,并经手动参数调整和自动优化之后,得到优化的 Offner 分光系统如图 5 所示,其全视场弥散斑均小于 30 μm 的工作像素尺寸,且全波段在空间截

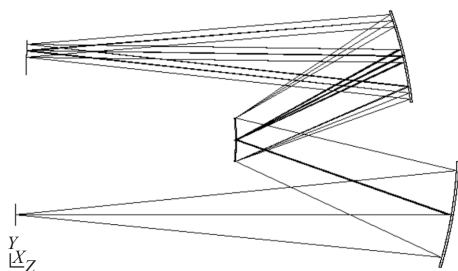


图 5 Offner 分光系统结构
Fig.5 Offner spectral structure

止频率 16.7 lp/mm 处都具有较高的传递函数值,具有优良的分光性能。

3.3 一体化消热差设计

将前面设计的前置镜头和 Offner 分光系统组合形成中波红外成像光谱仪,并分析该光谱仪在工作温度范围(-40~100 °C)内的温度特性,发现该光谱仪受温度的影响较大,在低温和高温条件下全视场的弥散斑尺寸都已经超出了实际工作像素尺寸 30 μm,因此需要对该光谱仪进行一体化消热差设计。

在 ZEMAX 多重结构编辑器中建立三个多重结构,分别对应 20、-40、100 °C 三种工作温度条件,除温度外,其他参数都使用热跟随解来控制。同时,选择镜筒材料为钛合金,其热膨胀系数为 $9.84 \times 10^{-6}/\text{°C}$ 。重新调整评价函数,将镜片曲率半径、厚度、空气间隔等都设置为变量,使用 ZEMAX 软件对光谱仪的结构参数进行全工作温度范围的优化仿真,最终得到的光谱仪结构如图 6 所示,整个光谱仪的尺寸为 128.92 mm×55.64 mm×22 mm (外壳和探测器的尺寸未计算在内),可见其体积较小。优化后的全工作温度范围内的点列图如图 7 所示,可见其弥散斑都在实际工作像素尺寸 30 μm 范围之内。

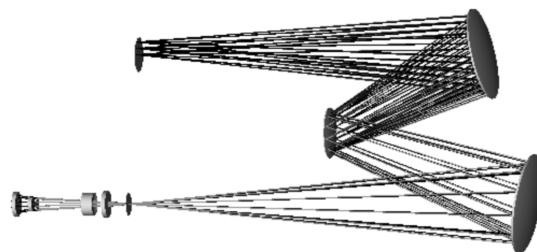


图 6 消热差的 Offner 光谱仪结构
Fig.6 Offner spectrometer structure after thermal elimination

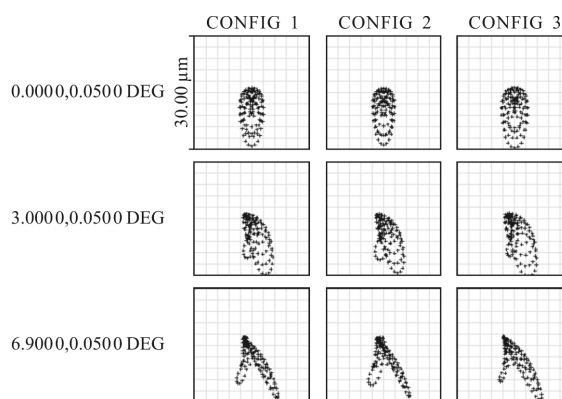


图 7 优化后的全工作温度范围点列图
Fig.7 Spot diagram in tempurture range after optimization

优化后的 Offner 光谱仪同样具有很好的传递函数特性,图 8、图 9 和图 10 分别是 5 μm 波长在 20、-40、100 °C 条件下所对应的传递函数曲线,可见其在空间截止频率 16.7 lp/mm 处的传递函数值都大于 0.35,且传递函数曲线受温度的影响很小,具有较稳定的温度性能。

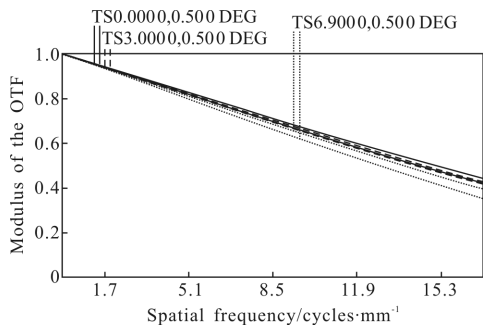


图 8 20 °C 条件下 5 μm 处传递函数曲线

Fig.8 MTF curves of 5 μm at 20 °C

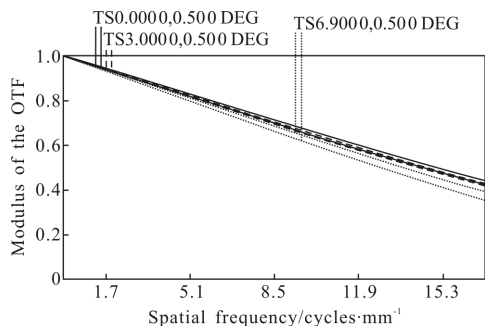


图 9 -40 °C 条件下 5 μm 处传递函数曲线

Fig.9 MTF curves of 5 μm at -40 °C

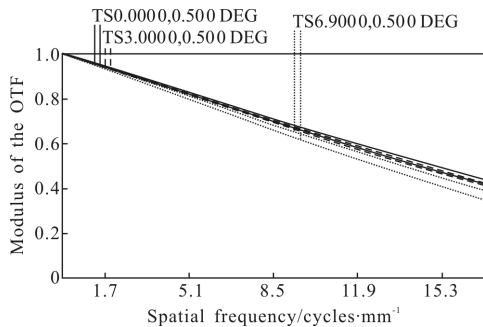


图 10 100 °C 条件下 5 μm 处传递函数曲线

Fig.10 MTF curves of 5 μm at 100 °C

另外,在 100 °C 条件下分析 3、4、5 μm 处的光谱分辨率,得到 2.985、3、3.015、3.985、4、4.015、4.985、5、5.015 μm 九个波长对应的点列图如图 11 所示,可见该光谱仪对 15 nm 间隔的弥散斑能够很好地分

开,满足表 1 中要求的系统光谱分辨率小于 15.6 nm 的要求。

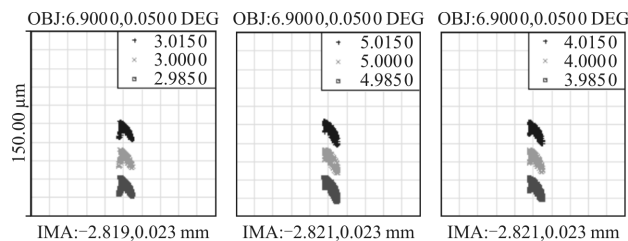


图 11 15 nm 间隔点列图

Fig.11 Spot diagram with 15 nm interval

4 测试

根据设计结果加工装调好的中波红外成像光谱仪如图 12 中的 A 所示。该成像光谱仪采用自制的中波红外镜头,定制了刻线密度为 40 lines/mm 的凸面光栅,采用碲镉汞中波红外探测器。

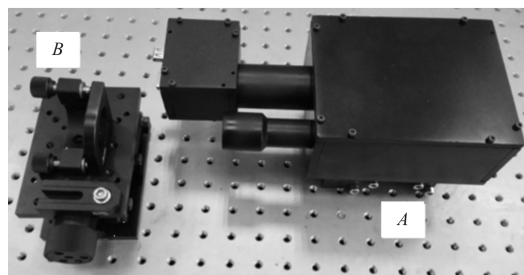


图 12 中波红外成像光谱仪

Fig.12 Mid-infrared imaging spectrometer

为了验证中波红外成像光谱仪的分光效果,选择 BHK 公司的 Maxir IR 宽波段(1~6 μm)红外光源模拟被测对象,在实验室将该光源安装在图 12 中的 B 所示的光学座上,进行了该光源的发射光谱测量,测试结果如图 13 软件界面所示,其光谱分布与 Maxir IR

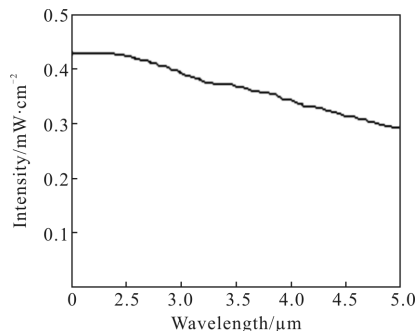


图 13 红外光源测试光谱

Fig.13 Test spectrum of infrared light

光源的光谱分布基本一致。可见,该中波红外成像光谱仪能够实现红外光谱的有效分光。

5 结 论

文中在分析红外系统消热差方程的基础上,明确通过选择不同热特性材料的合理组合可以设计出合理的消热差光学结构;在分析 Offner 结构原理的基础上,建立了一种简化的初始结构求解过程以及采用光学仿真软件进行优化的设计方法。最后,利用该方法设计了工作波段为 3~5 μm 的推扫式成像光谱仪,并进行了一体化消热差设计,工作温度范围为-40~100 $^{\circ}\text{C}$,全视场、全工作温度范围内的弥散斑小于 30 μm ,调制传递函数值在空间截止频率 16.7 lp/mm 处都大于 0.35,光谱分辨率大于 15 nm,具有较好的光谱分光性能。

参考文献:

- [1] Liu Ying, Sun Qiang, Lu Zhenwu, et al. Hyper-spectral imaging system with harmonic diffraction element in medium and far infrared [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(10): 6980-6987. (in Chinese)
- [2] Bi Yanmeng, Wang Qian, Yang Zhongdong, et al. Advances on space-based hyper spectral remote sensing for atmospheric CO₂ in near infrared band [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(5): 725-735. (in Chinese)
- [3] Feng Shuyi, Zhang Ning, Shen Ji, et al. Method of cloud detection with hyperspectral remote sensing image based on the reflective characteristics [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(2): 198-204. (in Chinese)
- [4] Zhou Quan, Wang Yuefeng, Wei Dapeng. Infrared transmission spectroscopy of transferred grapheme on sapphire [J]. *Infrared Technology*, 2014, 36(9): 695-699. (in Chinese)
- [5] Xiao Xizhong, Wang Yueming, Ma Jun, et al. Mutispectral measurements of infrared spectral characteristics of an aircraft [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(10): 292-297. (in Chinese)
- [6] John T Neu. Portable infrared surface inspection system: USA, US5714758[P]. 1998-02-03.
- [7] Yudaya R Sivathanu, Rony K Joseph. Fast infrared linear image optical instruments: USA, US6355930[P]. 2002-03-12.
- [8] Wilks P A, Jr, Mateer K R. Spectroscopy analyzer using a detector array. USA: US 6420708[P]. 2002-07-16.
- [9] Liu Ying, Wang Xuejin, Pan Yulong, et al. Design of hyper-spectral imaging system with harmonic diffraction element in medium and long infrareds [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(3): 57-585. (in Chinese)
- [10] Lan Weihua, Wan Min, Wang Kai, et al. The study of MWIR multispectral imaging technology [J]. *Opto-electronic Engineering*, 2012, 39(2): 59-62. (in Chinese)
- [11] Cheng Xin, Zhang Bao, Hong Yongfeng, et al. Optical design of an airborne dual-wavelength imaging spectrometer with high throughput [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(3): 690-695. (in Chinese)
- [12] Albin S, Barraclough T, Markos M, et al. Spectrometer flip top sample head: USA, US20130128266[P]. 2013-05-23.
- [13] Han Shunli, Zhang Peng. Research on multispectral imaging based on spectral band extension of infrared thermal image [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39 (B06): S109004. (in Chinese)
- [14] Zhang Hao, Fang Wei, Ye Xin. Dual-order overlapped offner imaging spectrometer in middle-and long-wave infrared regions [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(4): 965-974. (in Chinese)
- [15] Skidanov R V, Blank V A. A dual-range spectrometer based on the Offner scheme[J]. *CO*, 2016, 40(6): 968-971.
- [16] Bai Yu, Xing Tingwen, Lin Wumei, et al. Athermalization of middle infrared optical system [J]. *Journal of Applied Optics*, 2012, 33(1): 181-185. (in Chinese)
- [17] Liu Lin, Chen Xinhua, Shen Weimin. Development of an athermalization midwave infrared telescopic objective with fast speed[J]. *Optical Technique*, 2011, 37(4): 418-421. (in Chinese)
- [18] Chang Hong. Research on key techniques of thermo-optical stability for refractive infrared system [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011. (in Chinese)
- [19] Zhang Ying, Ding Xuezhuang, Yang Bo, et al. Design of three-lens athermalized and cooled midwave infrared objective [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(4): 0418005. (in Chinese)
- [20] Wang Yuanfangzhou, Bai Yuzhuo, Jia Yuchao, et al. A design of FIR athermal system [J]. *Infrared Technology*, 2012, 34(9): 531-534. (in Chinese)
- [21] Tong Yajun, Wu Gang, Zhou Quan, et al. Design method of offner-type imaging spectrometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(4): 1148-1152. (in Chinese)