

瞬态短波红外光谱仪光学系统设计

孟庆华

(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: 设计了瞬态短波红外光谱仪的光学系统。论述了光谱仪的工作原理和光学系统方案选择, 对 CZ-ERNY-TURNER 结构形式的光谱仪进行了光学设计和像差分析。该光学系统的波长范围为 900~1 700 nm, 光谱分辨率达到 5 nm, 谱面 20 mm 不平直度 0.021 mm。光学系统性能接近国外同类产品水平。

关键词: 光学系统设计; 短波红外; 光谱分辨率; 光谱仪

中图分类号: TH703; TH744.123

文献标识码: A

DOI: 10.3788/OMEI 20102709.0011

Optical System Design of Transient Shortwave Infrared Spectrometer

MENG Qin-hua

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

Abstract: The optical system of transient shortwave infrared spectrometer was designed. Theory of spectrometer and choice of optical system were introduced, optical system design and aberration analysis for CZERNY-TURNER structure spectrometer were studied. The performance of the optical system had approached the level of the congener foreign products, with the spectral inspection in the range from 900 nm to 1 700 nm, less than 5 nm of spectral resolution, straightness of image less than 0.021 mm.

Keywords: optical system design; shortwave infrared; spectral resolution; spectrometer

1 引言

光谱学是研究从紫外到红外光谱波段的光谱测量的一门科学,对很多学科的发展具有重要意义^[1-2]。光谱仪器已广泛应用于航天遥感、能源工程、医药研究、食品安全、空间工程、资源开发、国防、天文观测和环境保护等很多领域。随着固态阵列探测器的出现和计算机技术的快速发展,出现了由阵列探测器、计算机技术和平像场光谱仪相结合的瞬态光谱仪。许多研究领域对光谱仪器提出了小型化和高速瞬态光谱测量,而瞬态红外光谱测量技术正成为国内外的研究热点^[3-7]。光学系统是光谱仪的核心,光学系统的设计质量直接影响光谱仪的性能。本文研究了短波红外光谱仪光学系统的设计,并确定了相应的光谱仪的结构方式和主要参数。

2 基本原理和光学系统方案选择

光谱仪主要分为干涉型和分光型两大类。干涉型光谱仪是通过傅立叶变换获得信号光的光谱信息,特别适合对微弱光信号的探测,但帧频相对较低。分光型光谱仪是基于棱镜或光栅分光原理,将待测光按波长分开,对不同波长的光信号进行探测,获得信号光的光谱特征。分光型的光谱仪测量速度主要取决于探测器性能。

短波红外光谱仪的光学系统由准直物镜、色散元件、成像物镜3个部分组成。聚光系统把被测物质的光会聚到短波红外光谱仪的入射狭缝上,狭缝发出的光经准直物镜后变成平行光投向色散元件,色散元件将入射的复合光分解成单色光。成像物镜将空间上色散开的各波长的光会聚在成像物镜的焦平面上,形成按波长排列的狭缝单色像,光电接收器安置于成像物镜的焦平面上,即可测量被测物质光谱的强度和波长位置,进行光谱分析。短波红外瞬态光谱仪原理框图见图1。

色散元件是分光型光谱仪的核心元件,色散元件的选择主要包括棱镜分光和光栅分光。光栅分光的特点是对整个光谱范围可提供线性光谱色散,存



图1 短波红外瞬态光谱仪原理框图

在光谱级次重叠,光栅效率与波长有很大关系;棱镜分光的特点是不存在光谱级相互重叠的问题,光通量较高,色散有很大的非线性。根据实际要求,所设计的短波红外光谱仪采用平面闪耀光栅做为色散元件。通过选择刻槽形状,将能量集中到某一所需的光谱级,减弱零级和其余各级光谱。探测器选用512像元InGaAs线阵红外探测器。

选择与确定设计方案在光学系统设计中起着关键作用,方案选择的结果对光学系统设计和仪器制造将产生很大影响,经过分析确定了满足要求的两种方案,如图2和图3所示。方案一:准直物镜和成像物镜采用两片凹球面反射镜,入射狭缝和探测器位于光栅主轴的两侧,布局方式是EBERT-FASTIE型,有利于减小系统的彗差,减小或避免了二次衍射和多次衍射,装调略显不太方便。方案二:选用折叠交叉CZERNY-TURNER型,光学系统增

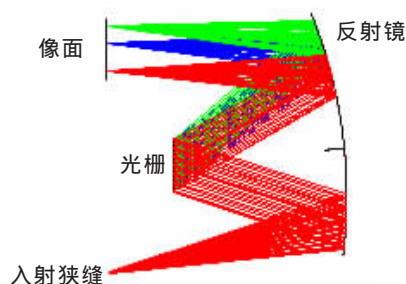


图2 EBERT-FASTIE型光学系统图

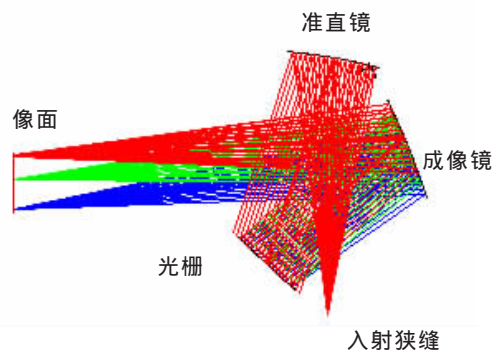


图3 CZERNY-TURNER型光学系统图

加了变量,可有效改善系统的慧差、成像质量,实现光学系统体积的小型化,方便了光学系统的安装调试。

3 光谱仪光学系统设计

3.1 设计指标

短波红外光谱仪的设计指标参考了国外类似仪器的性能指标,考虑自身的设计水平和加工制造能力,提出的主要技术指标为:光谱范围 900~1 700 nm;光谱分辨率 ≤ 5 nm; F 数 4; 谱面 20 mm 不平直度 0.025 mm。

根据短波红外光谱仪波段范围 900~1 700 nm,结合光学系统特点及设计要求进行具体光学元器件的结构参数设计。

3.2 光栅参数设计和光谱分辨率

光谱仪的分辨率是指分辨两条谱线的能力,它决定于仪器的色散率与谱线的强度分布轮廓和其相对位置。光谱仪的光栅分光元件对光学系统的分辨率起主要作用。光栅总刻划线数越多,衍射级次越高,理论分辨率越大。实际应用中,为了有足够的能量,提高系统的信噪比,同时又将各波长的光谱区分开,通常采用+1级或-1级衍射。光栅常数的选择对光谱仪小型化的设计也起着很重要的作用。系统采用平面反射式衍射光栅+1级作为衍射级次,在方案一中选择两块曲率半径相同的凹面反射镜分别作为准直物镜和会聚镜,曲率半径设为 170 mm;在方案二中选择两块曲率半径不同的凹面反射镜分别作为准直物镜和会聚镜,曲率半径设为 120 mm 和 200 mm。光栅设计的主要参数有光栅常数和光栅尺寸等。取光栅的尺寸为 18 mm,若光栅常数为 200 线/mm,则总刻划线数为 3 600,取光谱范围的最大波长 1 700 nm,理论分辨率为 0.5 nm。实际使用中受到入射狭缝宽度和系统像差的影响,实际系统的光谱分辨率会降低。

光学系统的像差包括球差、彗差、像散、场曲和畸变,这些像差都会造成谱线轮廓的变化,影响光谱仪的分辨率。在光学系统设计中要保证各个波长都有效聚焦在红外探测器焦平面上,通过光学元件参数的

合理选择尽量减小系统像差。

3.3 光学系统像差分析和像质评价

短波红外光谱仪全部由反射元件组成,只存在单色像差,球差和彗差对光学系统像质影响较大。球差使光谱线扩散,影响光谱分辨率;彗差使光谱线单边扩散,不仅降低光学系统的分辨率,而且使谱线轮廓的能量中心发生变化;因此,需要对球差和彗差进行精细校正^[9]。由于焦平面器件是阵列探测器,因而要求光谱仪的像面必须是平直的,最佳像面应选择在子午像面上。子午像面做到平像场,但还存在像散,将引起能量分散,但对光谱分辨率影响较小。像散的校正可通过加柱面透镜的办法,对弧矢光束起会聚作用,对子午光束不起作用。在光学系统中加入柱面透镜,虽然增加了能量利用,但柱面透镜安放在像面附近有可能产生很大的杂散光。设计中应根据实际的具体测量精度情况,通过信噪比能否得到提高来评估是否需要使用柱面透镜。初始参数确定后,以波长 900、1 300、1 700 nm 作为多重结构参数,点列图 RMS 为优化目标,反射镜半径、镜间隔和倾斜角等为变量,经 ZEMAX 优化,直至系统像质满足要求。

方案一:光学系统空间尺寸为 85 mm×86 mm×30 mm,方案二:光学系统空间尺寸为 96 mm×60 mm×30 mm。利用 ZEMAX 的像差分析软件对系统进行了像差分析,如图 4 和图 5 所示。评价采用点列图,图 4 为不加柱面镜,沿色散方向谱线展宽 0.027 mm,像散较大;图 5 为加了柱面镜,沿色散方向谱线宽度变化不明显,对分辨率影响不大,像散明显减小,能量利

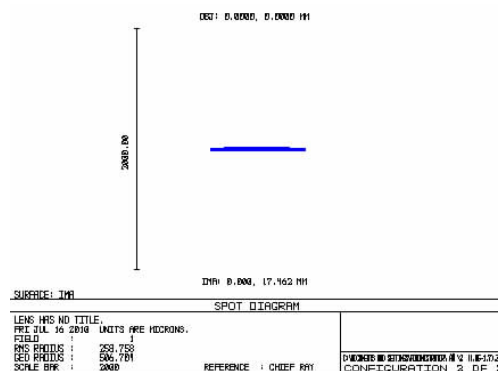


图4 系统中不加柱面镜点列图

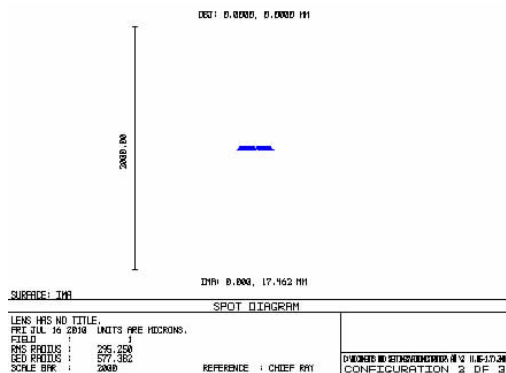


图5 系统中加柱面镜点列图

用率增加。

为减小杂散光的影响,应尽量减小其它衍射级对工作波长的影响。设计采用+1级光谱级次,需要对+1级两侧的0级和+2级衍射光谱作光路追迹,见图6和图7。从图6和图7可以看出,EBERT-FASTIE型和CZERNY-TURNER型0级和+2级衍射光谱分布在+1级光谱的两侧。0级光谱在像面的下面,像面上有

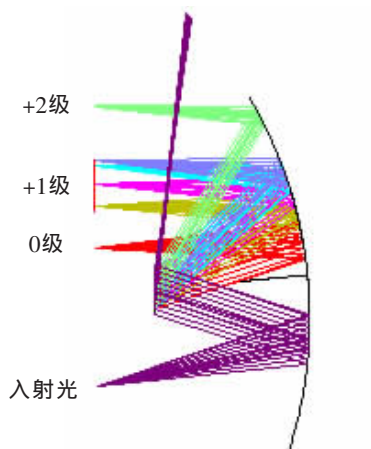


图6 EBERT-FASTIE型0级和+2级衍射分析图

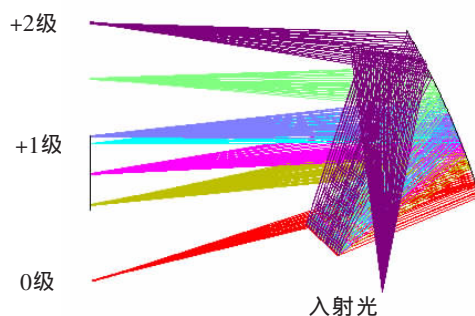


图7 CZERNY-TURNER型0级和+2级衍射分析图

4条谱线,分别是短波900 nm、1300 nm、1700 nm和1800 nm。像面的上面为+2级衍射光谱。CZERNY-TURNER型0级和+2级衍射光谱有可能混入+1级衍射光谱光路中,为避免0级和+2级衍射光谱产生杂散光,必须严格控制光栅、准直镜和成像镜的口径和位置。

4 结 论

本文以短波红外瞬态光谱仪的光谱范围和光谱分辨率等技术指标为设计依据,采用了平面衍射光栅做分光元件、InGaAs线阵红外探测器为接收器,选择折叠交叉CZERNY-TURNER型的光谱仪的设计方案。采用ZEMAX光学设计软件对短波红外瞬态光谱仪的分光系统、成像系统进行了设计与像差分析,得到光谱分辨率5 nm、谱面20 mm不平直度0.021 mm的较好设计结果。折叠交叉CZERNY-TURNER型的光谱仪的设计数据已应用到上海市科委资助的某粮食分析项目中。

参考文献

- [1] 林中, 范世福. 光谱仪器学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1989.
- [2] 严衍禄, 赵龙莲, 韩东海, 等. 近红外光谱分析基础与应用[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2005.
- [3] 郑玉权, 王慧, 王一凡. 星载高光谱成像仪光学系统的选择与设计[J]. 光学精密工程, 2009, 17(11): 2629-2637.
- [4] 吴一辉, 鞠挥. 微型光谱仪的发展现状[J]. 光学精密工程, 2001, 9(4): 372-376.

- [5] 季轶群, 宫广彪, 朱善兵, 等. 微型集成超光谱成像系统[J]. 光学 精密工程, 2009, 17(4): 727-731.
- [6] Wen Z Y, Chen G, Huang S L. Novel micro fiber spectrometer[J]. *SPIE*, 2003, 4983: 159-166.
- [7] 李娜娜, 安志勇, 崔继承. 中阶梯光栅光谱仪光学系统的安装和检测[J]. 光学 精密工程, 2009, 17(3): 531-536.
- [8] 张登臣, 郁道银. 实用光学设计方法与现代光学系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 1995.

作者简介: 孟庆华 (1963-), 男, 汉族, 吉林长春人, 硕士, 研究员, 主要从事光学测量仪器、光谱仪和光电经纬仪设计和研究。E-mail: changguangsuo@yahoo.com.cn

《光学 精密工程》(月刊)

《光学 精密工程》是中国仪器仪表学会一级学术期刊, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所主办, 科学出版社出版。由国内外著名科学家任顾问, 陈星旦院士任编委会主任, 国家科技部副部长曹健林博士担任主编。

《光学 精密工程》坚持学术品位, 集中报道国内外现代应用光学、光学工程技术、光电工程和精密机械、光学材料、微纳科学与技术、医用光学、先进加工制造技术、信息与控制、计算机应用以及有关交叉学科等方面的最新理论研究、科研成果和创新能力。本刊自2007年起只刊发国家重大科技项目和国家自然科学基金项目及各省、部委基金项目资助的论文。《光学 精密工程》竭诚欢迎广大作者踊跃投稿。

本刊获奖:

中国精品科技期刊
中国科学技术协会择优支持期刊
中国百种杰出学术期刊
第一届北方优秀期刊
吉林省双十佳期刊

国际检索源:

《美国工程索引》(EI Compendex)
《美国化学文摘》(CA)
《英国INSPEC》(SA)
《俄罗斯文摘杂志》(PJK)
《美国剑桥科学文摘》(CSA)

国内检索源:

中国科技论文统计源期刊
中国学术期刊(光盘版)
万方数据系统数字化期刊
台湾华艺中文电子期刊网
中国科学引文数据库
中国物理文献数据库
中国期刊网

中文核心期刊要目总览(北大)
中国学术期刊综合评价数据库
中国光学与应用光学文摘
中国科学期刊全文数据库
中国光学文献数据库
中国学术期刊文摘
中国物理文摘

电话: (0431) 86176855
传真: (0431) 84613409

E-mail: gxjmgc@ciomp.ac.cn gxjmgc@sina.com
<http://www.eope.net>