

基于准 Littrow 结构的高动态近红外光谱仪研究

孟 鑫, 李立功, 韩顺利, 侯喜报, 张 冰, 江 升

中国电子科技集团公司第四十一研究所电子测试技术重点实验室, 山东 青岛 266555

摘要 近红外光谱仪是重要的光学分析仪器, 具有重要的应用价值。为了实现近红外波段高动态、可调谐分辨率光谱的探测, 设置入射狭缝、中间狭缝和出射狭缝, 构建了基于准 Littrow 结构的单光栅双路光谱仪, 并利用 Zemax 软件进行光学系统仿真。在此基础上, 研制了实验室用近红外光谱仪, 包括光机模块、控制分析模块和探测模块, 系统的工作波长为 600~1700 nm。结果表明: 光束以准 Littrow 角 2 次经过平面光栅, 能有效消除出射光斑的空间色散效应, 减小出射光斑的几何尺寸, 进而有效抑制光谱信号的边模噪声和降低杂散光强度; 光路系统配合自主研发的高动态光电探测系统扩大了获取光谱信号的动态范围; 经过光谱标定和相对辐射标定后, 利用构建系统对窄带宽激光光源进行探测, 系统最高的光谱分辨率(即半峰全宽)优于 0.05 nm, 测得复原激光光谱在中心波长 ± 1 nm 范围内的动态范围优于 70 dB。

关键词 光谱学; 近红外光谱仪; 准 Littrow 结构; 高动态范围

中图分类号 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201737.1030002

High Dynamic Near Infrared Spectrometer Based on Quasi Littrow Structure

Meng Xin, Li Ligong, Han Shunli, Hou Xibao, Zhang Bing, Jiang Sheng

Science and Technology on Electronic Test and Measurement Laboratory, The 41st Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Qingdao, Shandong 266555, China

Abstract Near infrared spectrometer is an important optical analytical instrument and has important application. By setting the enter slit, middle slit and exist slit, a spectrometer with a single grating and dual channels based on quasi Littrow structure is built to detect near infrared spectrum with a high dynamic range and tunable resolution. The optical system is simulated by using Zemax software. Then, a near infrared spectrometer with wavelength from 600 nm to 1700 nm is set up, and the spectrometer is composed of the optical system, control and analysis system and detection system. The results show that the light passes through the plane grating twice with quasi Littrow angle, the spatial dispersion effect of exit light spot is eliminated and the size of exit light spot is reduced, and then the spectrum edge noise is effectively restrained and the intensity of stray light is reduced. The dynamic range of the spectrum is improved by using the self-developed high dynamic detect system that cooperates with optical system. After spectral calibrating and relative radiation calibrating, the narrow band laser source is detected by using the spectrometer. The highest spectral resolution of the spectrometer, that is full width at half maximum, is better than 0.05 nm, and the dynamic range of the recovery spectrum around the central wavelength with a tolerance of ± 1 nm is better than 70 dB.

Key words spectroscopy; near infrared spectrometer; quasi Littrow structure; high dynamic range

OCIS codes 300.6190; 300.6340; 080.2740

1 引 言

近红外光谱仪可用于探测目标在近红外波段的光谱辐射信息, 通过目标的光谱“指纹”效应能够进行物质成分的识别和分析^[1]。目前, 近红外光谱仪已成为诸多研究领域的基础测试仪器, 被广泛应用于天文观

收稿日期: 2017-03-20; 收到修改稿日期: 2017-05-21

基金项目: 电子测试技术重点实验室基金(9140C120301150C12057)

作者简介: 孟 鑫(1989—), 男, 博士, 工程师, 主要从事光谱偏振测试及成像光谱探测方面的研究。E-mail: eiqd@ei41.com

测、物质分析、地矿分析、生命科学和食品安全等领域^[2-6]。

根据分光方式的不同,近红外光谱仪主要分为光栅分光型和干涉型。其中,光栅分光型近红外光谱仪主要采用 Czerny-Turner 结构或 Offner 结构,通过线阵电荷耦合器件(CCD)探测光谱信息,内部没有运动部件,单帧探测能够获取光谱信息,在成本和成熟度等方面具有一定优势^[7-9],广泛应用于工业级光谱探测^[8-9]。但其信噪比较低,一般在 40 dB 以内,无法实现高动态光谱探测,不能满足激光拉曼光谱分析、高吸光度物质分析和光纤通信光源测试等应用的需求^[10-12]。为了扩大光栅光谱仪的动态探测范围并提高其信噪比,通常采用双光谱仪拼接的方法获取近红外光谱信息,通过设置狭缝来有效减少系统的杂散光^[13]。但由于双系统结构复杂,体积较大,且要求 2 个转动光栅具有较高的一致性,因此控制系统比较复杂。基于 Offner 结构和 Littrow 结构的单光栅双路分光系统在垂直于光栅刻线方向的视场中依次设置入射狭缝、中间狭缝和出射狭缝,有效消除了空间色散对出射光斑的影响^[14-15]。但在基于 Littrow 结构的系统中,经过中间狭缝的光束视场角会变大,导致第 2 次通过物镜和光栅后的出射光斑的像散和彗差较大,进而使得出射光斑尺寸增大,出射狭缝口径增大,不能进一步消除入射杂散光。虽然采用 Offner 结构的单光栅双路系统的像差较小,但其结构复杂,装调难度较大。

本文构建了基于准 Littrow 结构的单光栅双路分光系统,对该光学系统进行了仿真研究,并设计了光电探测系统。在此基础上,设计并搭建包括光机模块、控制分析模块和数据采集模块的实验样机,用以获取探测目标的高动态、高分辨率的光谱信息。

2 基本原理

2.1 基于准 Littrow 结构的光栅光谱仪

基于准 Littrow 结构的光谱探测系统的基本原理如图 1 所示。系统包括入射狭缝、中间狭缝、出射狭缝、平面反射镜、抛物面镜和平面反射光栅。入射狭缝位于抛物面镜的前焦点位置,平面反射镜 M1 与 M2 关于中间狭缝左右对称,中间狭缝位于抛物面镜前焦点所在的平面。

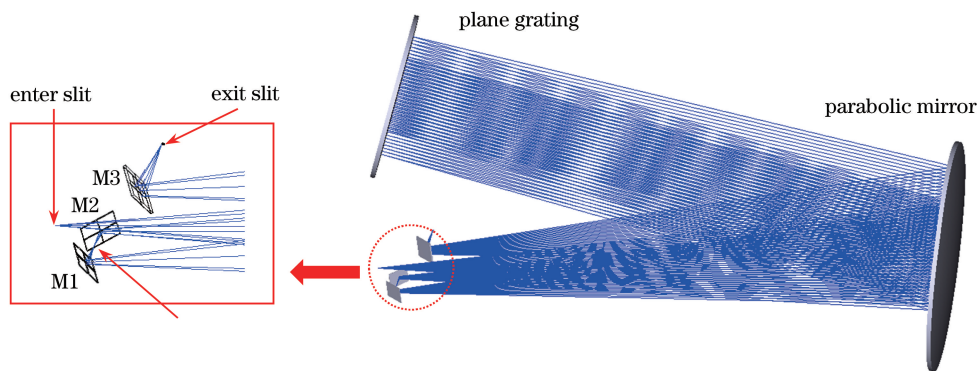


图 1 基于准 Littrow 结构的光谱仪原理示意图

Fig. 1 Diagram of proposed spectrometer based on quasi Littrow structure

探测光信号经过光纤或前置光学镜头导入光学系统后,首先经过入射狭缝进行空间滤光,随后发散光束进入抛物面镜,经抛物面镜准直形成平行光束,以准 Littrow 角入射平面反射光栅;经反射光栅衍射后,有效级的衍射光束返回抛物面镜,经抛物面镜会聚及反射镜 M1 反射后会聚在中间狭缝上,然后再经中间狭缝的光谱滤光后进入反射镜 M2,经 M2 反射后再次经过抛物面镜准直形成平行光束,并射向光栅。根据光路可逆原理可知,经光栅再次衍射的光束经过抛物面镜后形成会聚光束,然后再经过反射镜 M3 聚焦在出射狭缝位置,最后经出射狭缝消除杂散光后通过光纤或中继镜导入点探测器。

在基于准 Littrow 结构的系统中,入射狭缝、中间狭缝和出射狭缝关于抛物面镜共轭。待测光束 4 次经过抛物面镜,2 次经过平面光栅,光路展开后类似于一个色散相减型级联双光谱仪^[16]。光谱分辨率由中间狭缝的宽度决定,通过调节出射狭缝的宽度能够有效调节系统的杂散水平,进而提高系统的信噪比,从而实现高动态光谱探测。

根据光栅方程,当入射光第 1 次入射平面反射光栅时,有效衍射能级光束的出射角与光束入射角的关系满足:

$$d(\sin i_1 + \sin \theta_1) = m\lambda, \quad (1)$$

式中 d 为平面反射光栅的光栅常数, i_1 为第 1 次入射平面光栅时入射光线与光栅法线在垂直于光栅刻线界面内的夹角, θ_1 为第 1 次衍射的出射光线与光栅法线在垂直于光栅刻线界面内的夹角, m 为光栅有效衍射级次, λ 为入射光波长。衍射光束经过抛物面镜后会聚于中间狭缝,经过光谱滤波后第 2 次经过光栅。由于系统的对称性,第 2 次入射光栅的入射角满足:

$$i_2 = \theta_1, \quad (2)$$

式中 i_2 为第 2 次入射平面光栅时入射光线与光栅法线在垂直于光栅刻线界面内的夹角。根据光栅方程,当光束第 2 次经过平面衍射光栅时,有效衍射能级的光束的出射角与入射角满足:

$$d(\sin i_2 + \sin \theta_2) = m\lambda, \quad (3)$$

式中 θ_2 为第 2 次衍射时出射光线与光栅法线在垂直于光栅刻线界面内的夹角。由(1)~(3)式可知,经过平面光栅 2 次衍射后,光束的出射角满足:

$$\theta_2 = i_1, \quad (4)$$

即经过光栅的 2 次衍射作用后,光束的出射角在垂直于光栅刻线的界面内没有发生色散,因此经过系统后,光束没有发生空间上的色散,能保证系统出射光斑的几何尺寸不受光栅色散的影响,有效抑制了因空间色散而引入的边模噪声,扩大了系统的动态范围。此外,由于出射光斑的几何尺寸不存在空间色散,因此可以用小缝距的狭缝作为出射狭缝,这样既可保证较好地接收有效光信息,又可避免出射狭缝过大而引入较多的杂散光,提高了系统的信噪比。

2.2 光谱分辨率

系统的光谱分辨率受中间狭缝宽度的影响,当光束第 1 次经过光栅衍射后,色散作用导致在中间狭缝所在像面上形成空间色散的像点,受中间狭缝空间滤光作用的影响,只有满足特定波长条件的光束才能通过。根据光栅方程(1)式,系统的光谱分辨率表达式为

$$\delta_\lambda = \frac{d \cos i_1 \cdot a_m}{mf}, \quad (5)$$

式中 δ_λ 为光谱分辨率, a_m 为中间狭缝的宽度, f 为抛物面镜的焦距。系统的光谱分辨率与单光栅单路结构光谱仪的相同。

3 实验系统

基于准 Littrow 结构的近红外光谱仪系统模型,根据实验用途,设计并构建了基于准 Littrow 结构的近红外光谱仪样机。该样机的光谱波长范围为 600~1700 nm,最高光谱分辨率(即半峰全宽)优于 0.05 nm,在中心波长 ± 1 nm 范围内要求光谱的动态范围大于 70 dB,即获取窄带宽激光光谱强度最大值与 ± 1 nm 范围内最小探测值之比大于 70 dB。

3.1 光学系统仿真

利用 Zemax 软件对光学系统进行仿真,系统主镜采用焦距为 200 mm 的抛物面镜,平面光栅的闪耀波长为 1000 nm,刻线数为 1000 mm^{-1} ,入射光束的数值孔径为 0.1。入射狭缝、中间狭缝和出射狭缝位于抛物面镜前焦面,入射狭缝相对于焦点的坐标位置为(5 mm, 5 mm)。在进行光学设计和分析时用平面镜代替光栅,系统结构参数如表 1 所示(表中的 OBJ 表示目标光源)。前置狭缝与主镜距离为 187.939 mm。根据分辨率要求,由(5)式结合光学系统结构参数能够计算理想情况下的光谱分辨率。例如,在波长 1550 nm 附近,如果设置中间狭缝的宽度为 $10 \mu\text{m}$,那么对应的理想的光谱分辨率为 $0.035 \mu\text{m}$ 。

设定入射光波长为 1550 nm,当光源为理想点光源时,中间狭缝位置的光斑光强分布如图 2(a)所示,光斑的方均根(RMS)半径小于 $2.0 \mu\text{m}$,几何(GEO)半径小于 $3.5 \mu\text{m}$ 。中间狭缝位置的线扩散光强分布如图 2(b)、(c)所示,线扩散光强分布的半峰全宽明显小于中间狭缝的宽度,中间狭缝位置处的像差对光谱分辨率的影响不大,能够保证达到 0.05 nm 分辨率的要求。

表 1 光学系统结构参数
Table 1 Parameters of optical system

Surface	Comment	Radius /mm	Decenter in X direction /mm	Decenter in Y direction /mm	Tilt in X direction /($^{\circ}$)	Tilt in Y direction /($^{\circ}$)
OBJ			-5	5		
1	Parabolic mirror	-400		-68.404	20	
2	Plane grating	Infinity		68.404	20	
3	M1	Infinity	5	-5		-45
4	M2	Infinity	-5	-5		-45
5	M3	Infinity	5	5		45

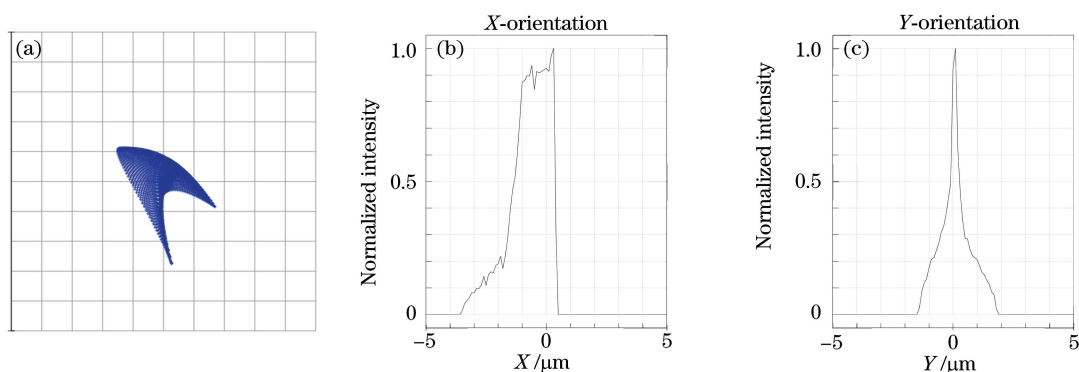


图 2 中间狭缝位置光斑的(a)光强分布和在(b) X方向、(c) Y方向的线扩散光强分布
Fig. 2 (a) Light intensity distribution and line spread intensity distributions in (b) X direction and (c) Y direction of spots on plane of middle slit

光束 2 次经过离轴抛物面镜后较好地消除了球差、彗差等初级像差,仅保留少量的像散,经过优化后,出射狭缝位置的光斑分布如图 3(a)所示,光斑的 RMS 半径小于 $3.5 \mu\text{m}$,几何半径小于 $5 \mu\text{m}$ 。波前分布如图 3(b)所示,波前像差的 RMS 为 0.056。几何环绕能量如图 3(c)所示。将出射光斑的几何尺寸有效地控制在 $10 \mu\text{m}$ 以内,设定出射狭缝的宽度为 $20 \mu\text{m}$,既能保证有效光入射,又能降低系统的杂散水平。

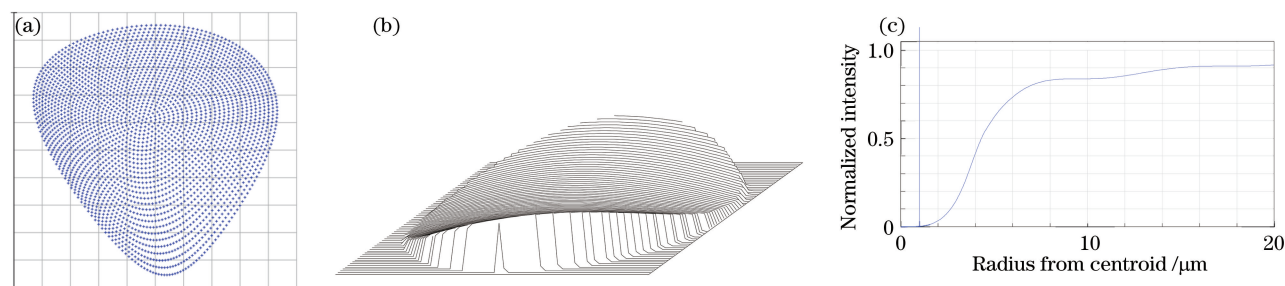


图 3 出射狭缝位置的光强分布。(a)光斑分布;(b)波前分布;(c)几何环绕能量
Fig. 3 Light intensity distribution on plane of exit slit. (a) Light spot distribution; (b) wavefront distribution; (c) geometric encircled energy

3.2 光电探测系统的设计

光谱仪的动态范围除了受光学系统杂散光抑制水平的影响外,还与光电探测系统的噪声抑制水平密切相关。为了实现高动态近红外光谱探测,采用自主研发的低噪声光电探测系统,该系统的光电信号处理流程如图 4 所示。探测器产生的电信号首先经过前置放大器,然后经过二级放大器。为了实现大动态范围及高准确度探测,放大电路设置多个挡位,根据输入光强度的大小选择不同的挡位进行模/数(A/D)转换。为了防止有效光信号淹没在电信号噪声中,选用具有较小暗电流的高性能 Si/InGaAs 双波段光电探测器。为了优化光电探测电路的性能,设计时应满足以下 3 方面的要求:1)前置放大电路要具有较高的输出信噪比,以提高光电转换效率;2)放大电路要具有较好的频率选择,以有效抑制杂频干扰,确保有效信号频段的传输;3)信号传输失真小,这需要对检测电路的布局布线进行优化设计,以保证阻抗匹配等电磁兼容性。

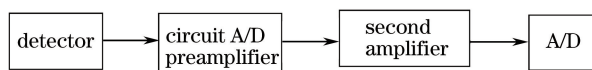


图 4 自主研发光电探测系统的光电信号处理流程图

Fig. 4 Flow chart of photoelectric signal processing of self-developed photoelectric detection system

目前该探测系统已经用于自主研发的 AV6337C 型高性能光功率计产品,并实现了 $-80\sim+10$ dBm 大动态范围的光信号探测,功率准确度达到 50 pW,为近红外光谱探测提供了可靠的探测系统。

3.3 实验系统的构建

在理论分析和系统仿真的基础上,构建了基于准 Littrow 结构的近红外光谱探测系统,该系统包括光机模块、探测模块和控制分析模块,整体构架如图 5 所示。其中,控制分析模块包括计算机、双口随机存储器 (RAM)、电机驱动和控制电路等,用于系统控制及处理获取的光谱数据。探测模块由探测器和信号处理电路组成,用于将探测器获取的近红外光谱强度信号转化为电信号,并进行放大、滤波、模/数转换等操作,以准确地对获取的光谱信息进行数字量化,采用 Si/InGaAs 双波段光电探测器获取波长为 600~1700 nm 的光谱辐射信息。光机模块主要包括光机结构件和光栅转动系统,为了保证光栅精密转动,采用直流无刷电机,并使用精密编码器对光栅运动进行控制和监视。光谱分辨率由中间狭缝的宽度决定,为了获取不同的分辨率,制作宽度不同的多个中间狭缝,宽度为 10~200 μm ,系统的最高光谱分辨率为 0.05 nm。通过更换不同的中间狭缝能够获取不同分辨率(0.05, 0.1, 0.5, 1 nm)的光谱曲线。

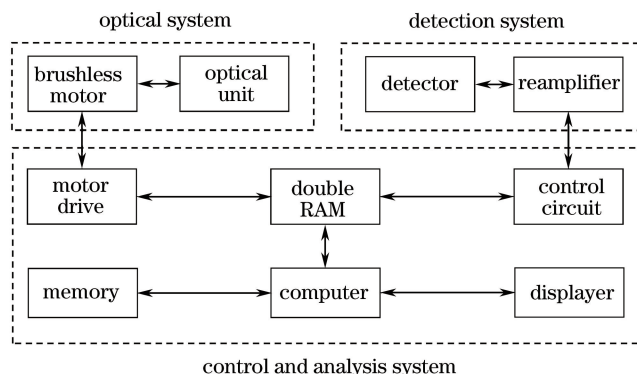


图 5 实验系统示意图

Fig. 5 Diagram of experimental system

探测光信号首先进入光机模块,在光栅作用下发生色散,经过中间狭缝的滤光作用后,只有特定波长的光束能够通过出射狭缝进入探测模块。进入探测模块的光束由探测器转化为电信号,经过放大、模/数转化、去噪等处理后形成量化的数字信号,进入双口 RAM,然后进入计算机进行数据记录和处理。同时,计算机通过双口 RAM 控制电机驱动,使直流电机实现精密转动。在电机作用下,色散光栅发生旋转,满足出射条件的光束波长发生变化,系统依次记录不同波长光束的强度,即可得到探测谱段内目标的光谱信息。光机模块中的器件均为系统的核心元件,采用全息反射光栅可减少因光栅刻蚀误差而产生的鬼线和高杂散光。

系统构建完成后,采用光电子一级计量站的光谱分析仪校准装置进行光谱标定和相对辐射标定。采用可调谐窄带激光器,利用多项式拟合法进行波长标定。相对辐射标定采用光功率计并配合光衰减器进行,先逐步标定探测器在不同放大倍率时的辐射值,然后利用多项式分段拟合法进行标定。经标定校准后,系统的工作波长为 600~1700 nm,最高光谱分辨率优于 0.05 nm,光谱测量准确度为 0.02 nm,功率测量不确定度优于 0.4 dBm,满足实验室样机的使用要求。

4 实验结果与分析

经光谱标定和相对辐射标定后,利用实验室样机对半峰全宽小于 0.02 nm 的窄带宽激光光源进行光谱探测,以验证其光谱分辨率和动态范围。首先对波长分别为 1550 nm 和 1310 nm 的激光光源进行探测,测试光谱带宽为 2 nm,采用 0.05 nm 分辨率对应的中间狭缝进行探测,获取的光谱曲线如图 6 所示。其中,

1550 nm 激光光谱曲线的半峰全宽为 0.046 nm, 1310 nm 激光光谱曲线的半峰全宽为 0.048 nm, 均达到了 0.05 nm 分辨率的要求。通过改变中间狭缝的宽度, 对波长为 1550 nm 的激光光源进行探测, 所得光谱曲线如图 7(a)~(c) 所示, 在 0.1, 0.5, 1 nm 设定分辨率下测得的光谱分辨率依次为 0.104, 0.49, 0.98 nm, 这表明构建的系统可以通过改变中间狭缝宽度来实现不同分辨率光谱的探测。

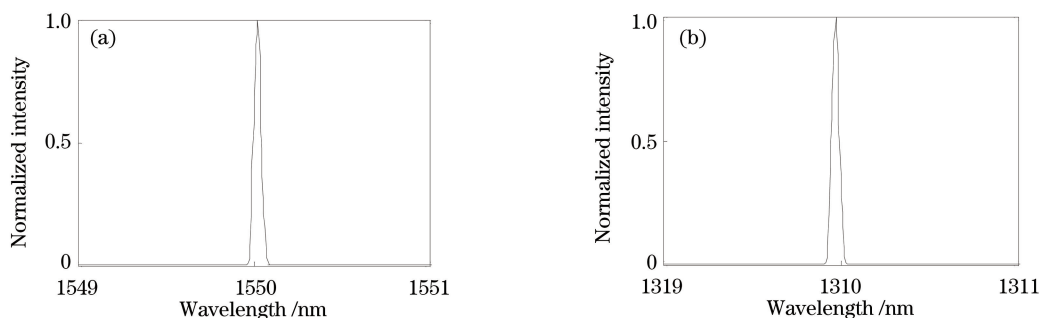


图 6 不同波长激光的最高分辨率复原光谱。(a) 波长为 1550 nm; (b) 波长为 1310 nm

Fig. 6 Recovery spectra with highest resolution of laser with different wavelengths.

(a) Wavelength of 1550 nm; (b) wavelength of 1310 nm

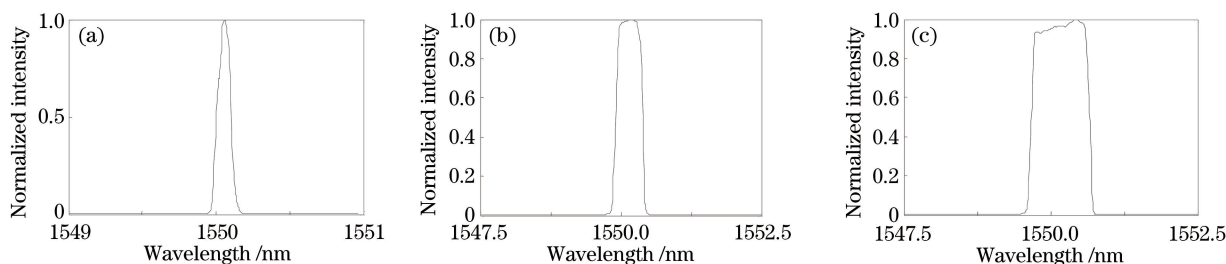


图 7 波长为 1550 nm 激光在不同分辨率下的复原光谱。(a) 0.1 nm 分辨率; (b) 0.5 nm 分辨率; (c) 1 nm 分辨率

Fig. 7 Recovery spectra of laser with wavelength of 1550 nm at different resolutions.

(a) Resolution of 0.1 nm; (b) resolution of 0.5 nm; (c) resolution of 1 nm

采用 0.1 nm 分辨率对应的中间狭缝对高动态、低噪声输出的激光器(信噪比达到 80 dB)进行光谱探测, 通过调节去噪电路的视频带宽以及出射狭缝的宽度, 实现低噪声、高动态光谱的探测, 所得波长为 1550 nm 的高动态窄带激光器的光谱曲线如图 8 所示。由图 8 可见, 在中心波长 ± 1 nm 范围内, 探测器获取的最大光强与最小光强之比超过了 72 dB, 达到了设计指标。这表明采用基于准 Littrow 结构的近红外光谱仪能够实现高动态、低噪声的光谱探测。

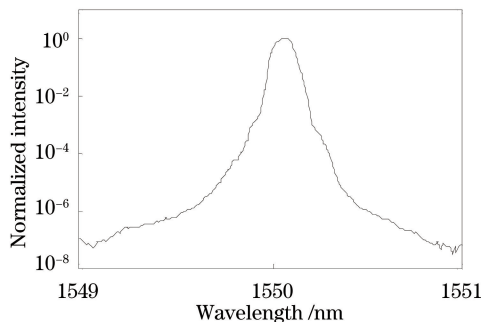


图 8 低噪声 1550 nm 激光器的激光光谱

Fig. 8 Spectrum of low noise laser with wavelength of 1550 nm

5 结 论

在研究级联双路光谱仪和 Littrow 结构单光栅双路光谱仪的基础上, 设计了基于准 Littrow 结构的单光

栅双路光谱仪。系统采用抛物面镜作为主镜,并设置入射狭缝、中间狭缝和出射狭缝。探测光束通过入射狭缝进入系统,并2次经过平面反射光栅,第1次经过平面光栅后发生色散,之后经过中间狭缝进行空间滤波,只有特定波长的光束才能够第2次经过平面光栅,并消除由第1次光栅色散引入的空间色散,形成会聚点并从出射狭缝出射。采用该结构能够有效减小级联双路光谱仪的体积、重量和复杂度,采用抛物面镜作为主镜能够实现宽谱段光谱探测,并保证出射光斑具有较好的成像质量。在系统设计的基础上构建了包括光机模块、探测模块和控制分析模块的实验室用样机,并进行光谱标定和相对辐射标定,探测光谱的波长范围为600~1700 nm。利用研制的样机对窄带宽激光光源进行探测,通过改变中间狭缝的宽度实现了0.05,0.1,0.5,1 nm分辨率的光谱探测;通过优化出射狭缝的尺寸,调节电路视频带宽,在分辨率为0.1 nm的条件下,复原激光光谱在中心波长 ± 1 nm范围内的动态范围达到72 dB,实现了对激光光谱的高动态探测。系统能够提供不同的光谱分辨率和高动态探测,因此能够更好地应用于激光拉曼光谱分析、高吸光度物质分析、光纤通信光源测试等应用领域。

参 考 文 献

- [1] Pasquini C. Near infrared spectroscopy: fundamentals, practical aspects and analytical applications[J]. Journal of the Brazilian Chemical Society, 2003, 14(2): 198-219.
- [2] Caffau E, Ludwig H G, Steffen M, *et al.* The photospheric solar oxygen project: III. investigation of the centre-to-limb variation of the 630 nm [O I]-Ni I blend[J]. Astronomy & Astrophysics, 2015, 579: A88.
- [3] Skillman E D, Kennicutt R C, Jr. Spatially resolved optical and near-infrared spectroscopy of I Zw 18 [J]. The Astrophysical Journal, 1993, 411: 655-666.
- [4] Stenberg B, Rossel R A V, Mouazen A M, *et al.* Chapter five-visible and near infrared spectroscopy in soil science[J]. Advances in Agronomy, 2010, 107: 163-215.
- [5] Ferrari M, Quaresima V. A brief review on the history of human functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) development and fields of application[J]. NeuroImage, 2012, 63(2): 921-935.
- [6] Teye E, Huang X Y, Afoakwa N. Review on the potential use of near infrared spectroscopy (NIRS) for the measurement of chemical residues in food[J]. American Journal of Food Science and Technology, 2013, 1(1): 1-8.
- [7] Liu Dongmei, Xia Rihui, Pan Yonggang, *et al.* Study of digital spectrometer based on charge coupled device[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(1): 0107003.
刘冬梅, 夏日辉, 潘永刚, 等. 基于电荷耦合器件的数字光谱分析仪的研究[J]. 光学学报, 2012, 32(1): 0107003.
- [8] Lee K S, Thompson K P, Rolland J P. Broadband astigmatism-corrected Czerny-Turner spectrometer[J]. Optics Express, 2010, 18(22): 23378-23384.
- [9] Kwo D, Lawrence G, Chrisp M. Design of a grating spectrometer from a 1:1 Offner mirror system[C]. SPIE, 1987, 818: 275-279.
- [10] Gao Guoming, Li Xue, Qin Zongding, *et al.* New method for eliminating background fluorescence of Raman spectrum and its application[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(2): 0230002.
高国明, 李雪, 覃宗定, 等. 消除拉曼光谱荧光背景的新方法及其应用[J]. 光学学报, 2013, 33(2): 0230002.
- [11] Liu Xuxia, Ji Yiqun, He Hucheng, *et al.* Analysis and design of Littrow-Offner spectroscopic system[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(4): 0422009.
刘旭霞, 季轶群, 贺虎成, 等. Littrow-Offner型分光系统的分析与设计[J]. 光学学报, 2013, 33(4): 0422009.
- [12] Gomez R, Dauphinee L, McMullin D, *et al.* Spectrum analysis and plant diagnostic tool for communication systems: US20150082363[P]. 2015-03-19.
- [13] Sokolova E, Mogo S. The double monochromator geometric theory and compensation of aberrations [J]. Optical Review, 2001, 8(4): 287-293.
- [14] Wildnauer K R, Stimple J R, Knight J D, *et al.* Optical spectrum analyzer having double-pass monochromator: US5233405[P]. 1993-08-03.
- [15] Mori T, Kaneko T, Kojima M. Double pass monochromator: US6166805[P]. 2000-12-26.
- [16] Sokolova E A. Geometric theory of double monochromator[C]. SPIE, 1999, 3779: 293-302.