

doi:10.3788/gzxb20134210.1218

双光束微型光谱仪

刘康, 余飞鸿

(浙江大学 光电信息工程学系, 杭州 310027)

摘要:结合微型光谱仪体积小、测量速度快的特点和双光路光谱仪的光束结构,基于双芯光纤和面阵探测器 Czerny-Turner 光学结构设计并研制成功一种微型双光束光谱检测系统——一双光束微型光谱仪. 系统中第一根双芯光纤将光源光强均分成两路,一路作为参考光路,另一路作为检测样品的样品光路. 参考光和被测样品光通过第二根双芯光纤传输并同时照明微型光谱仪的入射狭缝,两个纤芯沿狭缝长度(非色散)方向排列. 为保证两路光的成像光谱不会发生重叠和串扰,在交叉对称 Czerny-Turner 光学结构中加入消像散柱面镜元件,运用光学设计软件对光谱仪系统进行了优化设计. 光线追迹结果显示,双芯光纤传输参考光路与被测样品光路光束的成像光谱可以在 300~800 nm 范围内分离. 依据设计结果加工并装调成功双光束微型光谱仪系统实验样机,实现了参考光谱和被测样品光谱在光谱仪上的同时显示与测量. 实验表明,所设计的双光束光谱仪不仅具有双光路的光束结构,而且充分利用微型光纤光谱仪接口及配置灵活的特点,实现了真正意义上具有双光束光路结构的微型光谱仪系统.

关键词:微型光谱仪; 双光束; 双芯光纤; 消象散; 面阵 CCD 探测器

中图分类号: TH744.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2013)10-1218-6

Double-beam Miniature Spectrometer System

LIU Kang, YU Fei-hong

(Department of Optical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: A novel miniature double-beam spectrum measurement system called double-beam miniature spectrometer is proposed based on twin-core fiber and 2-D CCD detector Czerny-Turner spectrometer. The advantage of the miniature spectrometer with small size and fast measurement and the superiority of the double-path spectrophotometer with double light paths are both presented. In this system, the light intensity of the light source is divided equally into two parts by the first two-core fiber. One part is considered as the reference light path, and the other is considered as the sample light path. Then the reference light and the sample light are transferred to the slit of the spectrometer by the second two-core fiber. The two cores of the second two-core fiber are distributed along the direction of the length of the slit (the direction of the non-dispersion). In order to avoid the overlapping and the crosstalk between the sample spectrum and the reference spectrum, astigmatism corrected cylindrical lens is added into the symmetrical crossed Czerny-Turner optical bench. The optical design software is used to optimize the system aberration. The ray tracing result shows that the imaging spectra of the reference path and the sample path can be clearly distinguished in the wavelength range of 300~800 nm. Eventually, the experimental prototype of the double-beam miniature spectrometer is manufactured and aligned. The sample spectrum and the reference spectrum can be displayed and measured simultaneously with the system. The design method of the double-beam miniature spectrometer is

第一作者: 刘康(1985—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为光谱仪器设计及应用系统. Email: liukang@zju.edu.cn

导师(通讯作者): 余飞鸿(1964—), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为工程光学、光信息处理、智能化光学仪器与图像处理等.

Email: feihong@zju.edu.cn

收稿日期: 2013-04-10; 录用日期: 2013-06-05

verified by the experiment. The light path of double beam, the characteristic of fiber connector and flexible configuration are realized in the double-beam miniature spectrometer.

Key words: Miniature spectrometer; Double-beam; Twin-core fiber; Astigmatism corrected; 2-D CCD detector

0 引言

微型光谱仪以其体积小、成本低、测量速度快等优势广泛应用于科研教学、化学分析、工农业生产、医药学、遥感等领域. 随着微机电系统 (Micro-Electro-Mechanic System, MEMS) 和光谱预处理技术的发展, 国内外光谱仪领域的研究者们从光学设计方法^[1-2]、新型分光及探测器件^[3-4]、新型光路结构^[5-6]和光谱去噪算法^[7]等方向不断提升微型光谱仪的性能指标, 使其在光谱范围、分辨率、杂散光水平等方面已可以与传统大型光谱仪器相媲美. 但是由于其光束结构的限制, 微型光谱仪通常只能同时接收一束复色光信号, 对被测样品进行光谱测量或成分鉴定时需要分先后两次测量参考光和被测样品光. 因此, 相比双光束的光路结构^[8-9], 只具有单光束光路结构的微型光谱仪无法抵消光源波动、电噪音等引入的系统误差, 光度准确度的提升受到了限制.

本文结合微型光谱仪测量速度快, 体积小和大型光谱仪双光束光路结构的特点, 设计并研制了一种新型微型光谱仪系统——双光束微型光谱仪. 微

型光谱仪主机采用基于面阵 CCD 探测器消象散优化设计的交叉对称 Czerny-Turner 光学结构^[10-14], 两路光的成像光谱不会发生重叠和串扰, 可以实现参考光和被测样品光可以在探测器像面上的同时显示和测量分析.

1 双光束微型光谱仪系统原理

微型光谱仪普遍采用光纤接口, 光纤是微型光谱仪检测系统中传输光能的重要媒介, 传统的双光束光谱仪中的开放式光路结构显然对微型光谱仪的光能传输不利. 双芯光纤是一种“Y”型光纤, 有两根纤芯, 两个单芯端接口和一个双芯端接口; 单芯端的光纤接口只有一根纤芯, 双芯端的光纤接口含有两根纤芯, 两纤芯之间通过排布“盲丝”隔开指定的间隔距离. 由于双芯光纤的两根纤芯的传输是独立的、互不干扰的, 本文利用双芯光纤的光能传输来实现双光束的光路结构.

如图 1 所示, 双光束微型光谱仪系统由光源、第一双芯光纤、第二双芯光纤、微型光谱仪主机构成. 为保证光能传输的一致性, 两根双芯光纤的纤芯直

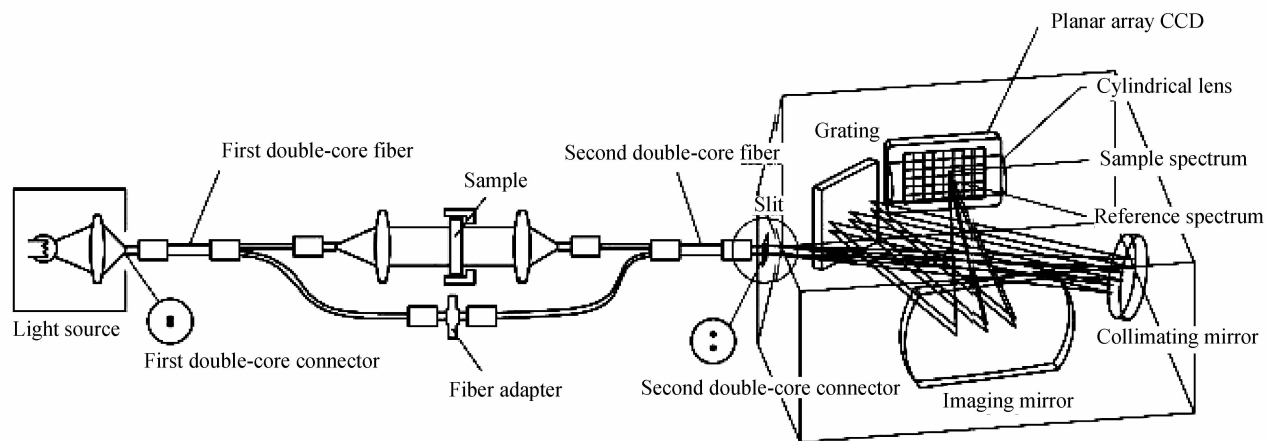


图 1 双光束微型光谱仪系统结构

Fig. 1 Schematic diagram of the double-beam spectrometer

径完全相同. 第一双芯光纤的双芯端连接到光源, 第一双芯端的两纤芯竖直紧密排列无间隙; 两个纤芯分别传输作为参考光路和测量样品光路的光能. 参考光路的单芯端通过适配器与第二双芯光纤的一个单芯端连接, 光纤适配器用于调整两根单芯光纤的耦合效率, 从而调节参考光进入微型光谱仪主机的光强. 测量样品光路的单芯端出射光线经过光纤准直镜的整形后, 平行光照射被测样品, 携带有样品信息的光线被另一个相同的光纤准直镜聚焦后, 被第

二双芯光纤的另一个单芯端接收. 第二双芯光纤将参考光和测量样品光同时传输到第二双芯端并连接到微型光谱仪主机的狭缝, 其中两根纤芯沿狭缝长度方向(竖直)排列.

微型光谱仪主机采用基于光栅色散的经典 Czerny-Turner 光学结构, 光纤出射的光能通过狭缝、准直镜反射准直、平面光栅色散、成像反射镜成像到面阵 CCD 探测器上. 第二双芯光纤的双芯端中两根纤芯之间间隔适当的间距, 可以将两路光束在

光谱仪探测器上分别成像为参考光谱与样品光谱图像, 为避免成像的参考光谱和样品光谱相互重叠, 以致无法准确对两路光谱进行分析, 需要对微型光谱仪进行消象散的优化设计(通常采用在像面前加入柱面镜器件), 将非色散方向的光斑会聚, 实现参考光谱和样品光谱的完全分离。

2 双光束微型光谱仪设计

2.1 设计理论

根据第1节中的系统结构, 双光束微型光谱仪的光学系统设计分为两个步骤: 首先, 完成基于 Czerny-Turner 光学结构的微型光谱仪设计, 确定光谱仪的系统参量和技术指标; 然后, 针对双芯光纤和消象散光学器件, 设计并实现两路光束成像光谱的分离。

2.1.1 主机设计

反射式 Czerny-Turner 光学结构是目前商品化微型光谱仪应用最广的结构, 光学系统由狭缝、准直镜、平面光栅、成像镜、探测器(像面)构成。系统分辨率由狭缝宽度、光栅常量、成像镜焦距、探测器参量决定; 系统中轴上、轴外像差通过调节反射镜焦距和离轴角来消除。交叉对称式 Czerny-Turner 结构(准直镜与成像镜焦距相同), 可以有效抵消彗差对成像的影响; 同时交叉式的光路结构可以降低系统的杂散光水平。非球面成像镜的使用可以有效地消除轴外的像差, 但基于成本和装配难度的限制, 本文采用了基于球面反射镜的交叉对称式 Czerny-Turner 光学结构实现微型光谱仪主机设计。

光栅是微型光谱仪分光的核心器件, 光栅常量的选择决定了光谱仪的工作波段和光谱分辨率。根据光栅色散方程, 对给定的成像系统和探测器, 狭缝的宽度越窄、光栅常量 d 越小, 光谱仪的光谱分辨率越高; 而当光栅常量 d 越小, 光谱仪的工作光谱范围就越窄。

$$d(\sin i \pm \sin \theta) = m\lambda \quad (m=0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (1)$$

准直镜的焦距和数值孔径受限于系统的相对孔径和像差容限。增加准直镜的数值孔径可以提升系统接收光线的的能力, 但同样会增加系统的像差和杂散光, 影响光谱仪的成像质量和分辨率。准直镜焦距 f_c 、数值孔径 D_c 与系统相对孔径 $F\#$ 关系如式(2)

$$\begin{cases} f_c \leq 256 \cdot \lambda \cdot (F\#)^4 \\ D_c \leq 256 \cdot \lambda \cdot (F\#)^3 \end{cases} \quad (2)$$

成像镜的焦距确定需要考虑面阵探测器的参量, 探测器的像面大小决定了成像光谱面的长度 L 。成像镜的焦距 f_i 与光谱仪的工作波段范围 $[\lambda_1, \lambda_2]$

以及成像光谱面长度 L 的关系可以用式(3)表示

$$L = f_i \cdot \left[\frac{\lambda_2/d}{\sqrt{1-(\lambda_2/d)^2}} - \frac{\lambda_1/d}{\sqrt{1-(\lambda_1/d)^2}} \right] \quad (3)$$

2.1.2 光束分离设计

双光束光谱仪的核心是在保证光谱分辨率的前提下实现两路光束(参考光和样品光)在探测器上成像光谱的分离, 其设计要点为: 1) 增大第二双芯端中两个纤芯的间距, 减小纤芯的直径; 2) 设计加入消象散元件, 将光谱仪非色散方向的光谱会聚。

增大两纤芯的间距: 对单个纤芯成像的本质是对大视场的光线成像, 所以过多的增大纤芯的间距会影响光谱仪的成像质量。减小纤芯的直径意味着对更小物成像, 会更接近于理想成像, 减少像差对光谱成像的影响; 但是传输的光能也更少, 会降低光谱仪的信噪比。所以在实际设计过程中需要综合考虑第二双芯光纤双芯端的纤芯直径与纤芯间距。

传统的 Czerny-Turner 光学结构的成像是长条形的狭缝像, 也就是说, 光谱成像在弧矢方向上是离焦的即存在较大的像散。离轴反射镜的象散^[6]可以用式(4)表示

$$\Gamma_a = f_c(\sin \alpha_c \tan \alpha_c) + f_i(\sin \alpha_i \tan \alpha_i) \quad (4)$$

式中, α_c 和 α_i 分别为准直镜和成像镜的离轴角度。消除光谱仪的像散可以采用自由曲面成像反射镜或在探测器前加装柱面镜等方法实现^[2-4]。为了能够将消象散的光学元件作为系统的附件来设计, 本文选择了在面阵探测器前加装柱面镜来消除象散。

柱面镜具有3个光学参量: 半径 R 、矢高 H 和材料。半径 R 影响成像点在色散方向上的成像宽度即光谱仪的分辨率; 矢高 H 影响成像点在非色散方向的会聚程度。那么, 光谱仪的柱面镜设计需要在不损失分辨率的情况下尽量将成像点会聚, 缩小成像点在非色散方向上的宽度。由于光谱仪工作波长范围较宽, 设计参量必须要权衡整个光谱范围各个波段的分辨率和成像会聚水平。

2.2 设计结果

根据双光束光谱仪设计方法, 运用光学 CAD 软件, 构建出图2所示的光学系统, 通过微调准直镜和成像镜的焦距和离轴角度优化光谱仪的成像质量。像面长度初始值设为 29 mm, 最终的设计结果: 中心波长处分辨率为 1 nm, 边缘波长处为 2 nm, 光谱仪工作波段范围为 200~1 100 nm。完成主机设计后, 系统加入柱面镜, 优化柱面镜的半径和矢高, 在不改变原始光学结构, 不降低系统分辨率的前提下实现像散的消除。

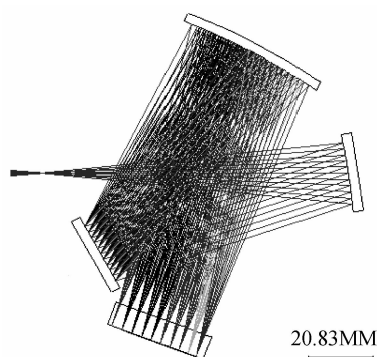


图2 交叉对称消像散 Czerny-Turner 光谱仪
Fig. 2 Symmetrical crossed astigmatism corrected Czerny-Turner spectrometer

双光束光谱仪中双芯光纤的纤芯直径和纤芯间距通过视场来体现:在光学 CAD 软件中,点列图是系统对某一个视场的成像结果;那么对于具有一定纤芯尺寸的光纤成像而言,每个波长的实际成像结果是几个视场成像结果的叠加.同时分析两个外视场的点列图来考察纤芯间距对光谱分离的影响,如图 3.

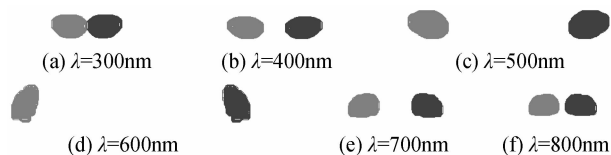


图3 双光束光谱仪点列图

Fig. 3 Spot diagram of the double-beam spectrometer

光线追迹的结果可以看出,在 300~800 nm 光谱范围内,双光束光谱仪经过消像散设计后可以将两路光束的成像像斑分离,像斑分离的间距与波长有关.分析表明,双光束光谱仪中第二双芯端传输到光谱仪狭缝的参考光和被测样品光可以同时成像在光谱仪像面上且不会发生串扰.最终,根据光纤的数值孔径设计完成单透镜的光纤准直镜,整个双光束光谱仪的系统参量如表 1.

表 1 双光束微型光谱仪系统参量

Table 1 System parameters of the double-beam miniature spectrometer

Specification	Value
Slit width/ μm	25
Focal length/mm	98.5(Collimating mirror) 98.5(Imaging mirror)
Grating/(line \cdot mm $^{-1}$)	300
Cylindrical lens/mm	$R=5$ $H=7.7$ Material: K9
First double-core fiber/ μm	Fiber core: 200 Distance between cores: 0
Second double-core fiber/ μm	Fiber core: 200 Distance between cores: 800
Collimating lens/mm	$f=10$ $f/\# = 2$ Material: quartz

3 实验

根据所设计的光学系统进行公差分析,依据公差分析的结果完成系统机械结构的设计并加工出样机进行调试,微型光谱仪主机中需要加入特殊设计的滤光片来消除高级次衍射光谱的影响^[1].面阵 CCD 探测器选用 SONY 公司的逐行扫描面阵 CCD ICX285AL 芯片,该面阵探测器具有 $1\ 360 \times 1\ 024$ 个有效像素,光敏面面积为 10.2×8.3 mm 2 ,像元大小为 6.45×6.45 μm^2 .选用普通多模光纤连接汞氩灯光源(Hg-1 Ocean Optics)对光谱仪调焦情况进行测试.如图 4 所示,光谱仪分辨率良好,中心波长双黄线(576.960 nm 与 579.066 nm)分辨清楚,整体分辨率达到设计要求.探测器在光谱仪色散方向上像素数目只有 1 360 个,长度为 10.2 mm,有效光谱工作范围约为 300 nm 左右,所以需要转动平面光栅才能将汞氩灯的所有特征谱线采集到.为了适用于一般性的可见光谱检测需求,将光栅角度固定到成像光谱如图 4(a)的位置.

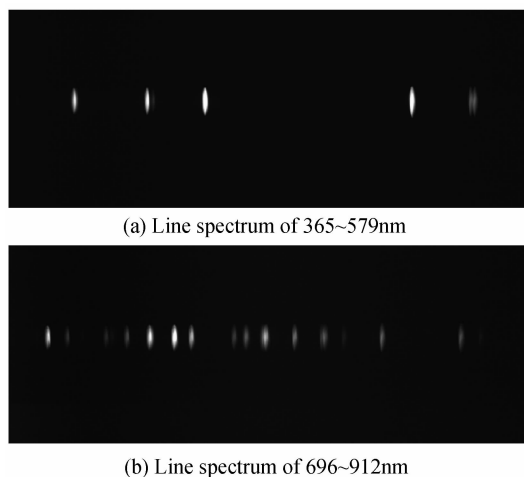


图4 普通多模光纤连接汞氩灯照明结果

Fig. 4 Illumination results of the spectrometer connected with Mercury-Argon lamp by multimode fiber

完成对光谱仪主机的装调后,对实际的光谱图像进行一维化处理并进行波长定标.将未接入任何光源信号的光谱仪采集图像作为系统的暗光谱信号,扣除暗光谱信号后,纵向积分一维化得到一维的汞氩灯测量谱线,如图 5.

汞氩灯的一维谱线进一步验证,整个系统分辨率良好,达到光学设计的要求.但是系统存在基线不平直的缺陷,其根本原因是由于探测器的灵敏度较高,系统接收到了影响成像质量的杂散光信号.采用系统参量法^[15]进行波长定标,选取光谱范围内所有 6 个特征波长点(365.015、404.656、407.783、435.833、546.074、576.960、579.066 nm)进行优化

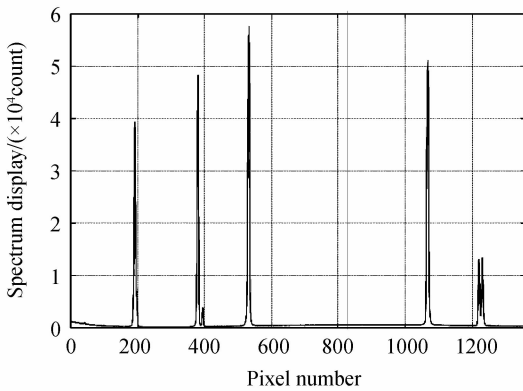


图5 双光束光谱仪汞氩灯实测一维谱线

Fig. 5 1-D spectrum line of the spectrometer connected with Mercury-Argon lamp

计算, 定标后光谱仪工作波长范围为 324.5~605.5 nm, 定标后波长与真值偏差保持在 0.1 nm 以内.

图 6 为搭建双光束光谱仪系统, 选用 DH-2000 氙卤灯组合光源 (Ocean Optics) 作为参考光源. 第一双芯光纤连接到光源光纤接口, 一路作为参考光接入光谱仪主机, 另一路连接到光纤准直镜, 用于测量光路. 参考光路的两根单芯光纤的单芯端采用光纤适配器连接, 样品光路的两根单芯光纤分别连接到光纤准直镜. 第二双芯光纤接入光谱仪主机的光纤接口, 经过调节保证两个纤芯端面沿狭缝长度方向竖直排列.

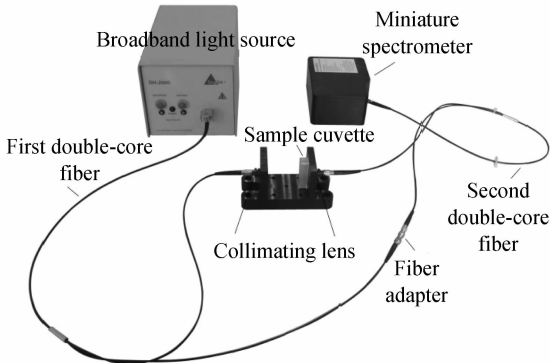


图6 双光束微型光谱仪系统实物

Fig. 6 Photograph of the double-beam miniature spectrometer system

在不放置样品情况下, 对双光束光谱仪成像情况进行测试, 如图 7 所示, 两路光束可以在像面上明显的分离. 调节光纤适配器的耦合效率, 将参考光路在像面上的成像光谱光强调节到与被测样品光路相近. 最终验证, 双光束光谱仪设计、安装、调试结果达到设计要求.

由于不同光纤的光能损耗不相同, 而且在样品光路中加入了两个光纤准直镜造成了更多的光能损失, 两路光束的光强不可能完全一致. 所以, 在进行实际光谱测量分析时需要两路光的光强进行补

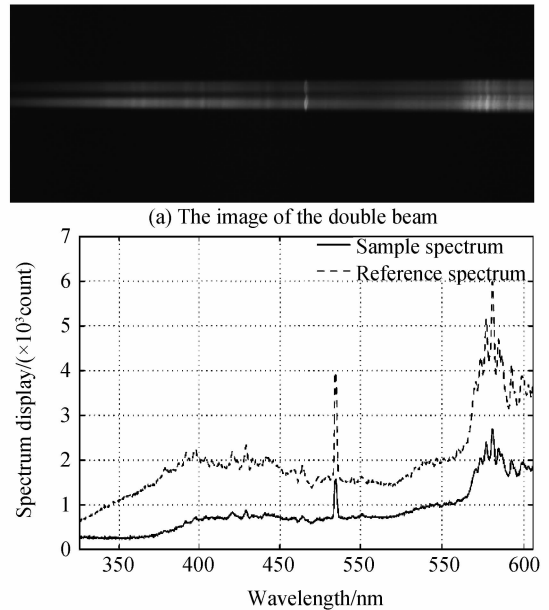


图7 双光束分离成像光谱

Fig. 7 The imaging spectrum of the double beam
 偿, 以保证未放置被测样品时两光路的光谱分布完全相同, 补偿系数 η 定义为

$$\eta = I_{ref_c}(\lambda_i) / I_{sample_c}(\lambda_i) \quad (5)$$

在未放置任何样品情况下对两路光束的成像光谱分布进行补偿计算, 得到 η 的分布曲线, η 是与波长相关的函数. 在进行样品透过率光谱测量时, 需要将样品光谱加入这个补偿系数再与参考光谱进行比对计算.

最终, 用双光束微型光谱仪测量了重铬酸钾透过率标准溶液, 测量结果如图 8. 图 8(a) 中上方的一

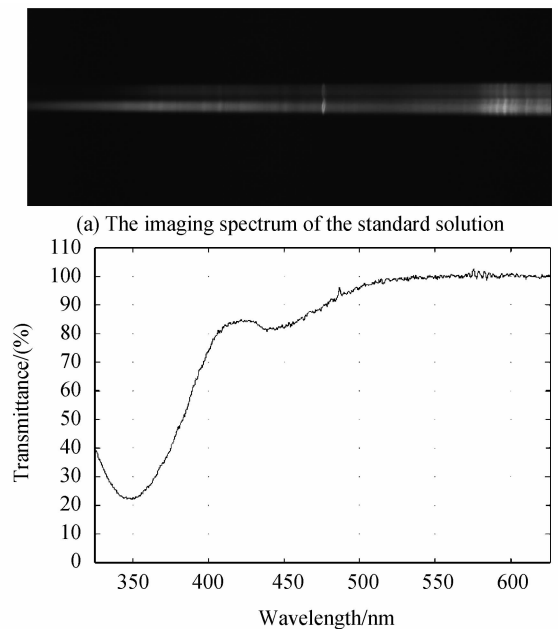


图8 双光束光谱仪实测透过率结果

Fig. 8 The transmittance measurement result with the double-beam miniature spectrometer

条光谱图像为重铬酸钾标准溶液的透射谱线,下方一条光谱图像为参考光氙卤灯组合光源的谱线.加入补偿系数 η , 比对两路光束得到重铬酸钾标准溶液的透过率谱线,如图 8(b). 系统测量得到的重铬酸钾标准溶液在 350 nm 处透过率为 22.6%,与标准值 22.8% 的偏差为 0.2%. 分析透过率谱线显示,采用双光束的光束结构,可以抵消光源波动和测量时样品池拿取而造成的误差,透过率峰值不会因为这些误差的影响跳动到 100% 以上. 如果长时间进行光谱测量,不需要重新进行参考光谱的读取,可以进行更为准确地光谱测量.

4 结论

本文首次提出了一种基于 Czerny-Turner 微型光谱仪、双芯光纤和面阵探测器的双光束结构微型光谱仪设计方法,并对系统的实现和数据处理进行了验证. 系统运用两根双芯光纤构建出双光路结构. 微型光谱仪主机为交叉对称 Czerny-Turner 光路结构,采用柱面镜进行消像散的优化设计. 双芯光纤纤芯直径 200 μm ,纤芯间距 800 μm ,设计结果可以在 300~800 nm 波段将参考光路与样品光路的成像光谱完美的分离. 高灵敏度的大面积面阵 CCD 探测器 SONY ICX285AL 将参考光和被测样品同时接收和显示.

双光束微型光谱仪样机的光谱检测结果显示,系统有效消除了光源波动、电噪音对光谱透过率检测的影响,并解决了传统单光束微型光谱仪需要两次测量的不便. 系统中不包含机械扫描转动结构,测量速度快,结合了一般单光束光谱仪和双光路光谱仪特点的同时又解决了两者的技术缺陷,可以快速精确进行光谱测量.

参考文献

- [1] XUE Qing-sheng. Design and study of limb sounder of atmospheric trace gas for spaceborne remote sensing[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **12**(3): 271-277.
薛庆生. 空间遥感大气痕量气体临边探测仪设计与研究[J]. *光子学报*, 2013, **12**(3): 271-277.
- [2] XUE Qing-sheng. Optical design of spaceborne broadband limb sounder for detecting atmospheric trace gas[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(6): 631-637.
薛庆生. 星载宽波段大气痕量气体临边探测仪设计[J]. *光子学报*, 2012, **41**(6): 631-637.
- [3] MO Xiang-xia, WEN Zhi-yu, ZHANG Zhi-hai, et al. Design and experiment of digital micro-mirror spectrometer optical system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(9): 1356-1360.
莫祥霞, 温志渝, 张智海, 等. 数字微镜近红外光谱仪光学系统设计与实验[J]. *光子学报*, 2011, **40**(9): 1356-1360.
- [4] SUN Xiao-xiao, HUANG Mei-zhen, WANG Yang. Development of miniature CMOS fiber optic spectrometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(1): 75-78.
孙小小, 黄梅珍, 汪洋. 面阵 CMOS 光纤光谱仪[J]. *光子学报*, 2013, **42**(1): 75-78.
- [5] SHI Man-man, HUANG Mei-zhen. Design of a small rapid scanning near infrared spectroscopy [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(4): 591-595.
施漫漫, 黄梅珍. 小型快速扫描近红外光谱仪的研制[J]. *光子学报*, 2011, **40**(4): 591-595.
- [6] LIU Ming-hui, PAN Su-xing, CHEN Yue-rui, et al. Path-folded infrared spectrometer consisting of 10 sub-gratings and a two-dimensional InGaAs detector[J]. *Optics Express*, 2009, **17**(17): 14956-14966.
- [7] LIU Yan, LIU Peng, YU Fei-hong. Denoising of spectral signal in miniature spectrometer based on stationary wavelet transform [C]. 2012 Symposium on Photonics and Optoelectronics, 21-23 May 2012, Shanghai, 2012: 1-4.
- [8] 李昌厚. 紫外可见分光光度计[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 16-21.
- [9] LIENERT B, PORTER J, SHARMA S K. Simultaneous measurement of spectra at multiple ranges using a single spectrometer[J]. *Applied Optics*, 2009, **48**(24): 4762-4766.
- [10] XUE Qing-sheng. Astigmatism-corrected Czerny-Turner imaging spectrometer for broadband spectral simultaneity[J]. *Applied Optics*, 2011, **50**(10): 1338-1344.
- [11] LEE K S, THOMPSON K P, ROLLAND J P. Broadband astigmatism-corrected Czerny - Turner spectrometer[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(22): 23378-23384.
- [12] XIA Guo, QU Bi-xiang, LIU Peng, et al. Astigmatism-corrected miniature Czerny-Turner spectrometer with freeform cylindrical lens[J]. *Chinese Optics Letters*, 2012, **10**(8): 081201.
- [13] AUSTIN D R, WITTING T, WALMSLEY I A. Broadband astigmatism-free Czerny-Turner imaging spectrometer using spherical mirrors[J]. *Applied Optics*, 2009, **48**(19): 3846-3853.
- [14] XU Li, CHEN Ke-xin, HE Qing-sheng, et al. Design of freeform mirrors in Czerny-Turner spectrometers to suppress astigmatism[J]. *Applied Optics*, 2009, **48**(15): 2871-2879.
- [15] LIU Kang, YU Fei-hong. Accurate wavelength calibration method using system parameters for grating spectrometers [J]. *Optical Engineering*, 2013, **52**(1): 013603.
- [16] LIU Kang, YU Fei-hong. Research on eliminating high-order spectrum in broadband miniature spectrometer system [C]. SPIE, 2012, **8415**: 841506.