

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2107522

# 一种改进型非交叉非对称 C-T 结构近红外 微型光谱仪设计\*

周 颖<sup>1</sup>, 黄云彪<sup>1</sup>, 李东玲<sup>2</sup>, 温 泉<sup>2</sup>

(1. 重庆川仪自动化股份有限公司 重庆 401121; 2. 重庆大学光电技术及系统教育部重点实验室 重庆 400030)

**摘 要:**针对基于固定光栅和阵列探测器的常规微型近红外光谱仪成本高、光谱范围窄等问题,提出了一种基于集成扫描光栅微镜的双探测器微型近红外光谱仪。该系统采用自制的集成扫描光栅微镜作为核心分光部件,可同时实现扫描与分光功能,光学系统设计利用两个聚焦镜和两个 InGaAs 单管探测器的空间布局避免不同光路之间的相互干扰,可实现双通道同时、独立工作,此外双通道探测器前内置不同截止波长的带通滤色片消除光谱重叠。采用光线追迹法建立了理论模型计算光学系统的初始结构参数;利用 ZEMAX 完成了光学系统的优化设计并给出优化结构参数。测试结果表明,该仪器工作波长范围:800~2 532 nm,分辨率:小于 12 nm(800~1 600 nm)、小于 17 nm(1 600~2 532 nm),整体尺寸:145 mm×135 mm×75 mm,具有宽光谱、小体积、低成本等优势。

**关键词:** 近红外;双探测器;宽光谱;微型光谱仪**中图分类号:** TH703 TH744 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4

## Design of the improved micro near spectrometer based on non-cross asymmetric C-T structure

Zhou Ying<sup>1</sup>, Huang Yunbiao<sup>1</sup>, Li Dongling<sup>2</sup>, Wen Quan<sup>2</sup>

(1. Chongqing Chuanyi Automation Co., Ltd., Chongqing 401121, China; 2. Key Laboratory of Optoelectronic Technology and System of the Education Ministry, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

**Abstract:** The conventional NIR spectrometers based on fixed grating and array detectors have disadvantages of high cost and narrow spectral range. To address these issues, the dual single detectors NIR micro spectrometers are proposed, which are based on integrated scanning grating micromirror. This system employs the integrated scanning grating micromirror as the core component, which can realize the scanning and diffraction simultaneously. The spatial layout of two focusing mirrors and dual InGaAs single detector are utilized to avoid the mutual interference between different optical paths in the optical system design. It can realize the simultaneous and independent operation of two optical paths. In addition, a band-pass filter with different cutoff wavelengths is established in front of the dual-path detectors to eliminate spectral overlap. A theoretical model is formulated by the ray tracing method to calculate the structural parameters of the optical system. The optimized design of the optical system is achieved by using ZEMAX and the optimal structural parameters are given. Test results show that the operating wavelength range is 800~2 532 nm. Resolution is smaller than 12 nm (800~1 600 nm) and 17 nm (1 600~2 532 nm), and the overall size is 145 mm×135 mm×75 mm. This instrument has the advantages of wide spectrum, small volume, low cost and other advantages.

**Keywords:** near infrared; dual detector; wide spectrum; micro spectrometer

收稿日期:2021-02-23 Received Date: 2021-02-23

\* 基金项目:国家重点研发计划(2018YFF01011200)项目资助

## 0 引言

近红外光谱分析技术具有快速、无损、多元数据分析等显著特点,可用于多种物质组分和含量的鉴定。随着环境监测、食品安全检测、现代农业、生物医学等领域<sup>[1-8]</sup>的飞速发展,近红外光谱仪已成为诸多国民经济领域的必备检测装备。但传统的近红外光谱仪体积大、功耗高、成本高,微型化、芯片化已成为近红外光谱仪的重要发展方向。目前,无论是传统的实验室大型或是便携式微型近红外光谱仪,均采用固定光栅结合阵列探测器的结构,由于 CCD 阵列探测器在近红外波段价格较高,造成近红外光谱仪整体成本较高,一定程度上已严重制约了现代近红外光谱分析技术的快速发展。

近年来,随着微光机电系统(micro optoelectronics mechanical system, MOEMS)技术的发展,为研制低成本、高性能的微型近红外光谱仪提供了新的机遇。基于扫描光栅微镜的微型近红外光谱仪核心器件为 MOEMS 扫描微光栅微镜。通过控制 MOEMS 扫描光栅微镜作周期性往复扫描,并通过准直和聚焦完成单管近红外探测器替代阵列近红外探测器,实现光谱信息的单管连续探测。由于该类仪器的核心分光器件—MOEMS 扫描光栅微镜同时实现了分光 and 扫描,减少了系统元器件、系统结构更加简单可靠,成为近年来的研究热点。2003 年,德国 Fraunhofer 微电子电路与系统研究所的 Grüger 等<sup>[9-10]</sup>利用自制的两款 MOEMS 扫描光栅微镜搭建了一台微型光谱仪,该款仪器在可见光范围内的探测波长范围为 160 nm,最佳分辨率为 0.7 nm,实现了原理验证。在此基础上,2004 年,德国 Fraunhofer IPMS 研究所的 Zimmer 等<sup>[11]</sup>提出了一款基于扫描光栅微镜的微型近红外光谱仪,该款仪器采用对称式 C-T 光学结构设计,探测光谱范围为 900~2 000 nm,体积为 90 mm×60 mm×50 mm。上述两款仪器初步验证了基于 MOEMS 扫描光栅微镜的微型光谱仪的可行性。但存在扫描光栅微镜驱动电压较大、转角较小,光路系统设计存在像差较大等一系列问题,且基于单个单管探测器的结构设计无法进一步拓宽此类光谱仪的探测波长范围,极大地限制了在长波近红外区域的应用。

本文针对目前基于 MOEMS 扫描光栅微镜的微型近红外光谱仪存在的问题,提出了一种非交叉非对称 C-T 光学结构,并完成微型近红外光谱仪系统搭建。实验结果证明,该系统采用双单管 InGaAs 探测器可有效实现近红外波段的探测,且满足低成本、小体积的要求。

## 1 结构及原理

本文所设计的双单管探测器微型近红外光谱仪结构如图 1 所示,主要由入/出射狭缝、集成扫描光栅微镜、准直镜、聚焦镜、长波通滤光片、InGaAs 单管探测器等组成。该双单管探测器微型近红外光谱仪的结构特点是同时存在两个聚焦镜和两个 InGaAs 单管探测器,可实现双通道同时工作,完成 800~2 500 nm 范围内的近红外光谱采集。

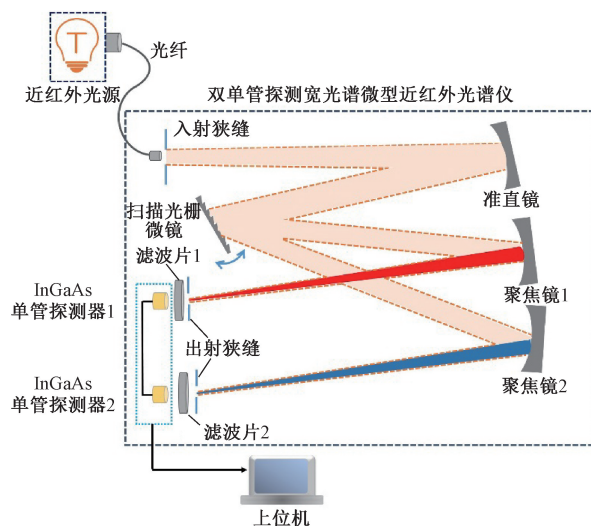


图 1 双探测器微型近红外光谱仪结构

Fig. 1 NIR micro spectrometer based on dual single detectors

该双单管探测器微型近红外光谱仪的工作原理为:近红外光源发出的光由光纤耦合后,经入射狭缝进入准直镜,由准直镜准直后进入集成扫描光栅微镜表面分光,分光后不同波长的单色光会分别进入聚焦镜 1、2,再由聚焦镜 1、2 聚焦后分别通过出射狭缝 1、2 后进入 InGaAs 单管探测器 1、2。这里,聚焦镜 1—出射狭缝 1—滤光片 1—InGaAs 单管探测器 1 组成一通道,聚焦镜 2—出射狭缝 2—滤光片 2—InGaAs 单管探测器 2 组成二通道,两个通道独立工作,互不影响。当驱动集成扫描光栅微镜转动时,不同波长的单色光会分别依次经过聚焦镜 1 和 2,通过设计合理的扫描角度,使一定波段的单色光只通过一个聚焦镜后进入对应的 InGaAs 单管探测器,确保两个通道互不干扰。该双探测器微型近红外光谱仪一通道的光谱探测范围为:800~1 600 nm,二通道的光谱探测范围为:1 600~2 500 nm,首先从结构设计上避免了二级光谱重叠。但由于光源光谱范围较宽,不可避免带来更高级次的光谱重叠。因此,提出采用在探测器前加入长波通滤光片来消除高级次光谱重叠的设计方案,其中一通道加入 800 nm 的带通滤色片,确保  $\leq 800$  nm 的波段被截止,二通道加入 1 500 nm 的带通滤色片,确保  $\leq 1 500$  nm 的波段被截止。



通过光学系统双通道结合不同截止波长的带通滤色片设计,可有效消除两个通道的光谱级次重叠。

通过集成扫描光栅扫描角度的精确控制,结合双单管探测器的光学系统设计,该双单管探测宽光谱微型近红外光谱仪可实现整个近红外波段(800~2 500 nm)的探测,并从结构设计上有效消除光谱级次的重叠。

## 2 模型建立

光学系统是微型近红外光谱仪最基本、最核心的部分,其设计好坏直接决定仪器整体性能的优劣。目前,较为普遍的光学系统有:Littrow 结构、Ebert-Fastie 结构和切尔尼-特纳(Czerny-Turner, C-T)结构<sup>[12-13]</sup>。Littrow 结构只采用一个凹面镜,即作为准直镜又作为聚焦镜,结构较为简单,但其彗差叠加。由于自身结构特点 Littrow 装置还会造成谱线弯曲,另外,由于入射狭缝和出射狭缝距离较近,还会造成仪器杂散光较大等问题。Ebert-Fastie 结构通常采用一个较大的凹面反射镜作为准直和聚焦镜,该结构优点是像散和谱线弯曲较小。但由于只采用一个凹面镜兼具准直和聚焦功能,经光栅衍射后的光又经凹面镜回到光栅表面,再次经光栅分光后经凹面镜聚焦到出射狭缝上,形成严重杂散光,且无法消除。C-T 结构是在 Ebert-Fastie 结构的基础上改进而来的,该结构是将 Ebert-Fastie 结构的一个凹面镜用两个凹面镜来替代,其中一个凹面镜作为准直镜,另外一个凹面镜作为聚焦镜使用,避免了 Ebert-Fastie 结构中二次衍射和多次衍射引入过多杂散光的问题。针对本文宽光谱近红外的设计需求,通过前期各种光学系统的对比,选择非交叉非对称型 C-T 结构作为初始结构,在此基础上改进并利用光线追迹法<sup>[14]</sup>建立理论模型。

图 2 为改进型非交叉非对称 C-T 光学系统结构的主要参数及符号示意图。其中  $S$  为入射狭缝, $G$  为自主研发的集成扫描光栅<sup>[15-16]</sup>, $M$  为准直镜, $M_1$ 、 $M_2$  分别为聚焦镜 1、2, $E_1$ 、 $E_2$  分别为探测器 1、2。

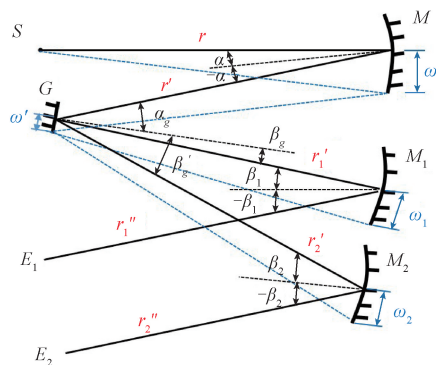


图 2 双探测器微型近红外光谱仪光学结构参数

Fig. 2 The optical system of NIR micro spectrometer based on the dual single detector

根据干涉条件可知,对于一通道,复合光经准直( $M$ )—集成扫描光栅微镜分光( $G$ )—聚焦( $M_1$ )—探测( $E_1$ )的光程函数可写为:

$$F_1 = r' + r'_1 + (\omega'/d)\lambda_1 \quad (1)$$

其中, $r'$ 为准直镜 $M$ 到集成扫描光栅微镜 $G$ 的光程; $r'_1$ 为集成扫描光栅微镜 $G$ 到分别为聚焦镜1( $M_1$ )的光程; $\omega'$ 为集成扫描光栅微镜的半口径(本文采用的集成光栅尺寸为6 mm×6 mm); $d$ 为集成闪耀光栅的光栅常数; $\lambda_1$ 为入射到探测器1( $E_1$ )的对应波长。同理,对于二通道,复合光经准直( $M$ )—集成扫描光栅微镜分光( $G$ )—聚焦( $M_2$ )—探测( $E_2$ )的光程函数可写为:

$$F_2 = r' + r'_2 + (\omega'/d)\lambda_2 \quad (2)$$

其中, $r'_2$ 为集成扫描光栅微镜 $G$ 到分别为聚焦镜2( $M_2$ )的光程; $\lambda_2$ 为入射到探测器2( $E_2$ )的对应波长。

无论一通道或二通道,光程函数均要满足干涉加强条件。根据费马原理,光程函数 $F_1$ 和 $F_2$ 均应满足如下条件:

$$\begin{aligned} \partial F_1 / \partial \omega' &= 0 \\ \partial F_2 / \partial \omega' &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

即确保不同通道的光有相同极值点,此条件也即理想成像条件。式(3)说明此时探测器1、2上的光斑是严格像点(弥散光斑的半径无限趋于0)。

当满足理想成像条件(即式(3))时,一通道和二通道的光相位相同,也即满足干涉加强条件;若不满足理想成像条件,一通道和二通道的光相位不同,导致像点处光强损失,则偏离理想成像条件的光程函数,可以写成:

$$\Delta F_1 = \int (\partial F_1 / \partial \omega') \quad (4)$$

$$\Delta F_2 = \int (\partial F_2 / \partial \omega') / d\omega'$$

根据瑞利判据可知,当满足如下条件时:

$$\Delta F_1 = \int_{\omega'}^{2\omega'} \frac{\partial F_1}{\partial \omega'} d\omega' \leq \frac{\lambda_1}{4} \quad (5)$$

$$\Delta F_2 = \int_{\omega'}^{2\omega'} \frac{\partial F_2}{\partial \omega'} d\omega' \leq \frac{\lambda_2}{4}$$

探测器1、2检测到的不同通道的光斑同样满足理想成像条件。

因此,根据瑞利判据可将式(1)和(2)改写为:

$$\begin{aligned} F_1 &= r' + r'_1 + (\omega'/d)\lambda_1 + \lambda_1/4 \\ F_2 &= r' + r'_2 + (\omega'/d)\lambda_2 + \lambda_2/4 \end{aligned} \quad (6)$$

另外,对于集成闪耀光栅 $G$ ,有如下关系:

$$\omega' = \omega \cos \alpha \quad (7)$$

其中, $\omega$ 为准直镜的半口径。

因此,利用式(1)~(7),并知 $r'$ 、 $r'_1$ 、 $r'_2$ 均为平行光束,且 $r' = \infty$ 、 $r'_1 = \infty$ 、 $r'_2 = \infty$ ,则可知从入射狭缝 $S$ 经准直镜 $M$ 到集成闪耀光栅 $G$ 的光程函数为:



$$F = r + r' - \omega'(\sin \alpha + \sin(-\alpha)) + \frac{\omega'^2}{2} \left[ \left( \frac{\cos^2 \alpha}{r} - \frac{\cos \alpha}{R} \right) + \left( \frac{\cos^2(-\alpha)}{r'} - \frac{\cos^2(-\alpha)}{R} \right) \right] + \frac{\omega'^3}{2} \left[ \frac{\sin \alpha}{r} \left( \frac{\cos^2 \alpha}{r} - \frac{\cos \alpha}{R} \right) + \frac{\sin(-\alpha)}{r'} \times \left( \frac{\cos^2(-\alpha)}{r'} - \frac{\cos^2(-\alpha)}{R} \right) \right] \quad (8)$$

其中:  $r$  为入射狭缝  $S$  到准直镜  $M$  的光程;  $R$  为准直镜  $M$  的曲率半径;  $\alpha$ 、 $-\alpha$  分别为准直镜  $M$  的入射角和反射角。式(8)建立起从入射狭缝  $S$  经准直镜  $M$  到集成闪耀光栅  $G$  的光程函数与准直镜  $M$ 、闪耀光栅  $G$  相关光学参数之间的关系。

将式(8)对  $\omega'$  求偏导并利用反射定律, 可得:

$$\delta \alpha_g = \frac{3(2\omega')^2 \cos^2 \alpha_g \sin \alpha}{4R^2 \cos^3 \alpha} \quad (9)$$

式(9)即为进入集成闪耀光栅分光前光束偏离主光轴的角度。

此时, 对光栅方程  $d(\sin \alpha_g + \sin \beta_g) = \lambda_1$  求偏导, 可得:

$$\delta \beta_g = -\frac{\cos \alpha_g}{\cos \beta_g} \delta \alpha_g = \frac{3(2\omega')^2 \cos^3 \alpha_g \sin \alpha}{4R^2 \cos \beta_g \cos^3 \alpha} \quad (10)$$

式(10)即为经集成闪耀光栅分光后光束偏离主光轴的角度。

则经集成闪耀光栅分光后成像物点的横向偏差可以写为:

$$\Delta \alpha_1 = \frac{1}{2} R_1 \cos \beta_1 \delta \beta_g = -\frac{3(2\omega')^2 R_1 \sin \alpha \cos \beta_1 \cos^3 \alpha_g}{8R^2 \cos^3 \alpha \cos \beta_g} \quad (11)$$

其中,  $R_1$  为聚焦镜  $M_1$  的曲率半径;  $\beta_1$  为聚焦镜  $M_1$  的入射角。

同理, 可以给出经集成闪耀光栅  $G$  分光后再经聚焦镜  $M_1$  聚焦后进入探测器  $E_1$  的光程函数为:

$$F_1 = r'_1 + r''_1 - \omega'(\sin \beta_1 + \sin(-\beta_1)) + \frac{\omega'^2}{2} \left[ \left( \frac{\cos^2 \beta_1}{r'_1} - \frac{\cos \beta_1}{R_1} \right) + \left( \frac{\cos^2(-\beta_1)}{r''_1} - \frac{\cos^2(-\beta_1)}{R_1} \right) \right] + \frac{\omega'^3}{2} \left[ \frac{\sin \beta_1}{r'_1} \left( \frac{\cos^2 \beta_1}{r'_1} - \frac{\cos \beta_1}{R_1} \right) + \frac{\sin(-\beta_1)}{r''_1} \times \left( \frac{\cos^2(-\beta_1)}{r''_1} - \frac{\cos^2(-\beta_1)}{R_1} \right) \right] \quad (12)$$

其中,  $r'_1$  为聚焦镜  $M_1$  到探测器  $E_1$  的光程,  $\beta_1$ 、 $-\beta_1$  分别为聚焦镜  $M_1$  的入射角和反射角。

同理, 式(12)对  $\omega'$  求偏导并利用反射定律, 可得:

$$\delta \beta_1 = -\frac{3(2\omega')^2 \cos^2 \beta_g \sin \beta_1}{4R_1^2 \cos^3 \beta_1} \quad (13)$$

式(13)即为经聚焦镜  $M_1$  聚焦后光束偏离主光轴的

角度。则, 此时成像物点的横向偏差可以写为:

$$\Delta \beta_1 = \frac{1}{2} R_1 \cos \beta_1 \delta \beta_1 = -\frac{3(2\omega')^2 \cos \beta_g \sin \beta_1}{8R_1 \cos^2 \beta_1} \quad (14)$$

由此可知, 探测器  $E_1$  接收到的像点的总的横向偏差即为:

$$\Delta_1 = \Delta \alpha_1 + \Delta \beta_1 = -\frac{3(2\omega')^2 R_1 \sin \alpha \cos \beta_1 \cos^3 \alpha_g}{8R^2 \cos^3 \alpha \cos \beta_g} - \frac{3(2\omega')^2 \cos \beta_g \sin \beta_1}{8R_1 \cos \beta_1} \quad (15)$$

由瑞利判据式(5)知, 当满足如下条件:

$$\Delta_1 = \Delta \alpha_1 + \Delta \beta_1 \leq \frac{\lambda_1}{4} \quad (16)$$

即可认为此时在探测器  $E_1$  上接收到的像斑为理想像点。

对于探测器  $E_2$  来说, 从入射狭缝  $S$  经准直镜  $M$  到集成闪耀光栅  $G$  的光程函数同样为式(8)所示, 只是经集成闪耀光栅  $G$  分光后再经聚焦镜  $M_2$  聚焦后进入探测器  $E_2$  的光程函数与式(12)不同, 可写为:

$$F_2 = r'_2 + r''_2 - \omega'(\sin \beta_2 + \sin(-\beta_2)) + \frac{\omega'^2}{2} \left[ \left( \frac{\cos^2 \beta_2}{r'_2} - \frac{\cos \beta_2}{R_2} \right) + \left( \frac{\cos^2(-\beta_2)}{r''_2} - \frac{\cos^2(-\beta_2)}{R_2} \right) \right] + \frac{\omega'^3}{2} \left[ \frac{\sin \beta_2}{r'_2} \left( \frac{\cos^2 \beta_2}{r'_2} - \frac{\cos \beta_2}{R_2} \right) + \frac{\sin(-\beta_2)}{r''_2} \times \left( \frac{\cos^2(-\beta_2)}{r''_2} - \frac{\cos^2(-\beta_2)}{R_2} \right) \right] \quad (17)$$

其中,  $r''_2$  为聚焦镜  $M_2$  到探测器  $E_2$  的光程;  $R_2$  为聚焦镜  $M_2$  的曲率半径;  $\beta_2$ 、 $-\beta_2$  分别为聚焦镜  $M_2$  的入射角和反射角。

同理, 对  $\omega'$  求偏导并结合反射定律, 可得经聚焦镜  $M_2$  聚焦后光束偏离主光轴的角度为:

$$\delta \beta_2 = \frac{3(2\omega')^2 \cos^2 \beta_g \sin \beta_2}{4R_2^2 \cos^3 \beta_2} \quad (18)$$

则成像物点的横向偏差可以写为:

$$\Delta \beta_2 = \frac{1}{2} R_2 \cos \beta_2 \delta \beta_2 = -\frac{3(2\omega')^2 \cos \beta_g \sin \beta_2}{8R_2 \cos^2 \beta_2} \quad (19)$$

而此时的式(11)应改写为:

$$\Delta \alpha_2 = \frac{1}{2} R_2 \cos \beta_2 \delta \beta_g = -\frac{3(2\omega')^2 R_2 \sin \alpha \cos \beta_2 \cos^3 \alpha_g}{8R^2 \cos^3 \alpha \cos \beta_g} \quad (20)$$

故探测器  $E_2$  接收到的像点的总的横向偏差即为:

$$\Delta_2 = \Delta \alpha_2 + \Delta \beta_2 = -\frac{3(2\omega')^2 R_2 \sin \alpha \cos \beta_2 \cos^3 \alpha_g}{8R^2 \cos^3 \alpha \cos \beta_g} - \frac{3(2\omega')^2 \cos \beta_g \sin \beta_2}{8R_2 \cos \beta_2} \quad (21)$$

同理, 由瑞利判据式(5)知, 当满足条件:



$$\Delta_2 = \Delta_{\alpha_2} + \Delta_{\beta_2} \leq \frac{\lambda_2}{4} \quad (22)$$

即可同样认为此时在探测器  $E_2$  上接收到的像斑为理想像点。

### 3 光机设计

#### 3.1 光学设计

在光学系统优化设计前,首先要考虑系统的工作波段范围、分辨率、像差以及系统体积等因素。随后,由上述理论分析知,式(16)和(22)为满足瑞利判据情况下,探测器 1、2 最后接收到理想像斑所满足的条件。该条件可作为改进型非交叉非对称 C-T 光学系统设计的基本理论依据。论文采用 ZEMAX 光学设计软件<sup>[17]</sup>来完成光学系统的优化设计。其中,狭缝宽度及光栅常数很大程度决定分辨率的高低。另外,长焦也有利于分辨率的提高,但却与系统的微型化设计相矛盾。最终,经过优化设计之后,改进型非交叉非对称 C-T 光学系统的设计结果如图 3 所示。

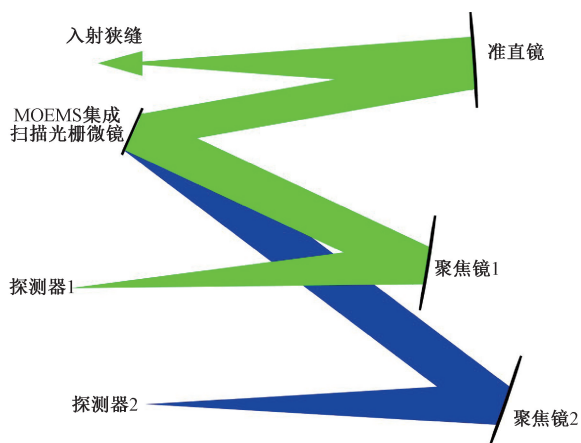


图 3 改进型非交叉非对称 C-T 光学系统

Fig. 3 The designed print of uncrossed and asymmetric Czerny—Turner optical system

由于闪耀光栅集成在 MOEMS 扫描光栅显微镜上,并随扫描光栅显微镜一起做周期性往复运动,为了满足 800~2 500 nm 波长扫描,扫描角度需满足如下关系<sup>[13]</sup>:

$$\hat{\varphi} = \frac{1}{2} \arccot \sqrt{\left( \frac{\lambda_{\max} + \lambda_{\min}}{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}} \right) \cot \gamma} \quad (23)$$

其中,  $\gamma$  为闪耀角;  $\lambda_{\min}$  和  $\lambda_{\max}$  分别为最小和最大探测波长。由式(23)即可得出 MOEMS 集成扫描光栅显微镜的光学转角与探测波长范围和闪耀角之间的关系。

该改进型非交叉非对称 C-T 光学系统的工作波长范围为:800~2 500 nm,入射狭缝为 50  $\mu\text{m}$ ,光栅常数为

250 1/mm,准直镜和两个聚焦镜的焦距均为 50 mm。该光学系统的整体光谱分辨率如图 4 所示。在 800~1 600 nm 波段整体分辨率在 10 nm 以内,在 1 600~2 500 nm 波段整体分辨率在 15 nm 以内。此外,整个波段像差得到了严格控制,光斑的一致性较好,谱线平直。其中,1 600~2 500 nm 波段分辨率比 800~1 600 nm 波段较低,这是因为波长越长,衍射角越大,聚焦镜 2 的离轴角度也较大,远超出高斯光学理想的成像条件。

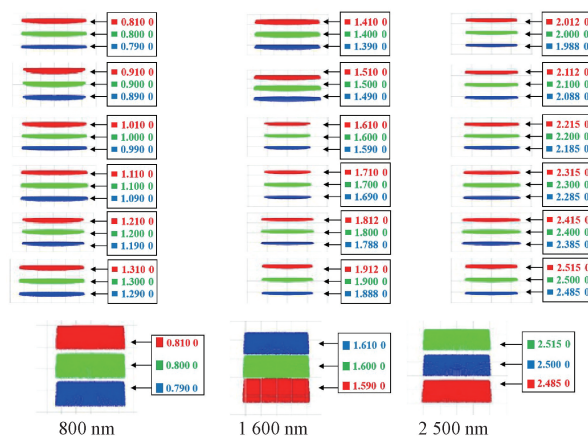


图 4 不同波长的点列图对比

Fig. 4 Comparison of different RMS spots

基于理论推导及光学系统优化仿真,该改进型非交叉非对称 C-T 光学系统主要参数如表 1 所示。

表 1 改进型非交叉非对称 C-T 光学系统主要参数  
Table 1 The main parameters of the improved non-cross asymmetric C-T optical system

参数	值
$r/\text{mm}$	50
$r'/\text{mm}$	50.2
$r'_1/r'_2$	70.1/103.7
$r''_1/r''_2$	48.3/47.7
$\alpha/(\circ)$	15
$\beta_g/(\circ)$	-45.1
$\alpha_g/\beta'_g$	11.2/24.5
$\beta_1/\beta_2$	9/16
$d/\mu\text{m}$	4
$m$	+1
准直镜/聚焦镜直径/mm	25.4
入射/出射狭缝宽度/ $\mu\text{m}$	50/75
闪耀角/ $(\circ)$	7.9
扫描角度/ $(\circ)$	$\pm 7$



### 3.2 结构设计

双探测器微型近红外光谱仪的光学器件包括狭缝、集成扫描光栅显微镜、准直镜、聚焦镜、长波通滤光片、单管探测器。双通道的光学系统设计不可避免造成元器件较多。在结构设计方面,首先不能造成各器件之间的干涉,其次保证各器件的装配误差尽可能小,且对像质影响较大的关键因素要实现精细可调,这样才能保证较好地实现光学设计的目标。

根据上述原理,完成了各元器件夹具与系统结构设计,整体布局如图5所示。

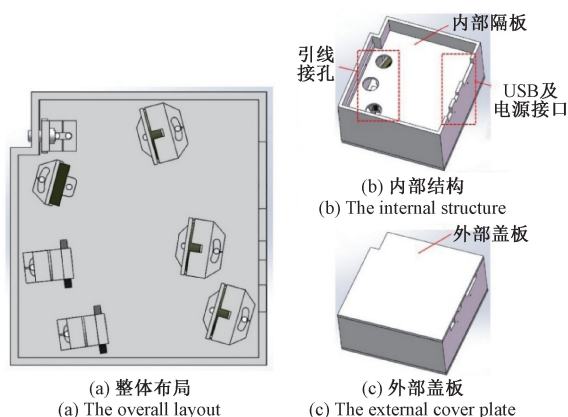


图5 系统布局

Fig. 5 The layout of designed NIR micro spectrometer

将光纤与入射狭缝、集成扫描光栅显微镜单元以及探测系统置于底板的左半侧,将准直/聚焦镜置于底板右半侧,在确保系统整体微型化的基础上保证各元器件之间互不干涉且方便可调,机壳内的整体布局如图5(a)所示。通过在底板上设计定位孔的办法来保证各器件之间的相对距离(包括轴向和径向)与光学系统设计一致。每个元器件夹具与基座底部均设计了圆弧形开槽,通过绕定位孔自由转动来控制子午角度偏差。同时,每个单元基座底部设置定位滑槽来保证各个器件定位的准确性。

采集卡安装在光学系统上方,光学系统与电路板之间设计有内部隔板如图5(b)所示,保证两者之间互不干涉。另外,在内部隔板上设计了3个圆形孔洞,用来将集成扫描光栅显微镜和探测器1、2分别与电路板相连接。侧壁采用一体化机加工的方式,提高系统的抗震性。且侧壁设计有USB接口、电源接口,还预留有二次开发接口。

## 4 实验研究

在完成装配后,搭建了测试分析平台如图6所示,测试系统主要设备为:光栅常数为 $250\text{ l/mm}$ ,谐振频率为 $243.9\text{ Hz}$ 的MOEMS集成扫描光栅显微镜;入射狭缝为

$50\text{ }\mu\text{m}$ ,出射狭缝为 $70\text{ }\mu\text{m}$ ;纤径为 $100\text{ }\mu\text{m}$ 的MZ11L1型氟化锆( $\text{ZrF}_4$ )中红外光纤跳线;探测器1(G10899,光敏面直径 $0.5\text{ mm}$ ,响应范围: $0.5\sim 1.7\text{ }\mu\text{m}$ )和探测器2(G12183,光敏面直径 $0.5\text{ mm}$ ,响应范围: $0.9\sim 2.6\text{ }\mu\text{m}$ )前分别装置FELH0800和FELH1500型长波通滤光片。基于上述配置,完成系统测试分析。

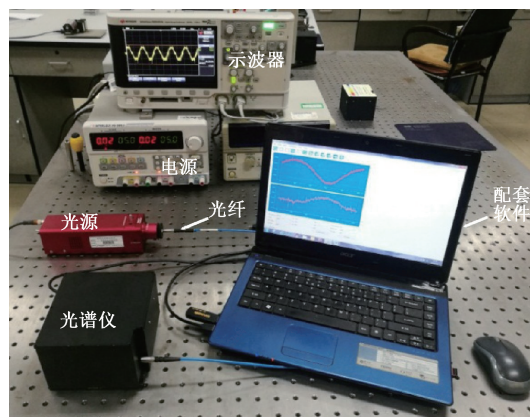


图6 测试系统

Fig. 6 The test system

双单管探测器1和2可同时探测不同波段的光谱,探测器1和2的单周期光谱响应曲线如图7所示。

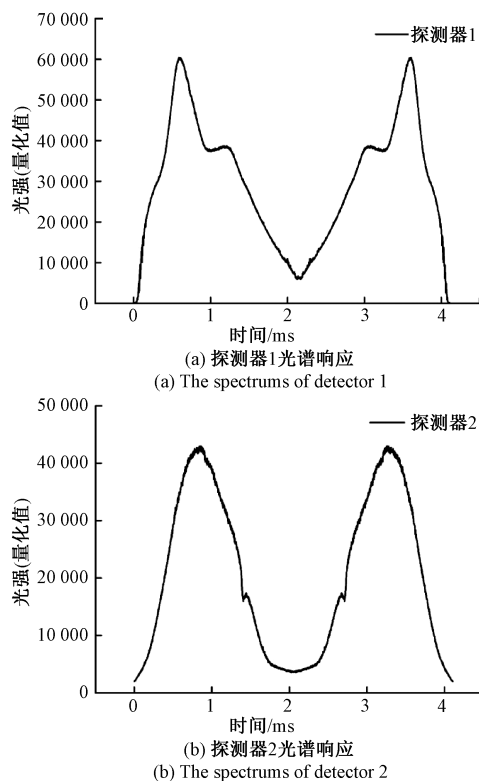


图7 探测器1和探测器2的光谱响应

Fig. 7 The spectrums of detector 1 and detector 2



扫描光栅微镜的谐振频率为 243.9 Hz,扫描光栅微镜每往复运动一个周期,可对称显示两幅完整光谱,故单幅光谱的采样周期为  $1/(2 \times 243.9 \text{ Hz}) = 2.05 \text{ ms}$ ,如图 7 所示。图 7(a) 显示探测器 1 (800~1 600 nm) 单周期光谱曲线,图 7(b) 显示探测器 2 (1 600~2 500 nm) 单周期光谱曲线。由于探测器 1 和 2 选型不同,故光强响应量化值有所区别。

选择中心波长为 810、1 580、2 392 nm 的窄带滤光片进行光谱探测范围的测试。标定后的光谱曲线如图 8 所示。图 8 为分别放置中心波长为 810 nm 和 1 580 nm 窄带滤光片时探测器 1 的光谱曲线,由图可知,在 810 nm 处和 1 580 nm 处均有输出响应。由于在探测器 1 前装置了 FELH0800 长波通滤波片,故经实际测试探测器 1 的光谱探测范围为:800~1 646 nm。图 9 为分别放置中心波长为 1 580 nm 和 2 392 nm 窄带滤光片时探测器 2 的光谱曲线。从图 9 可知,探测器 2 在 1 580 nm 和 2 392 nm 两个窄带滤光片处均有响应。由于在探测器 2 前装置了 FELH1500 长波通滤波片,故实测的探测器 2 光谱探测范围为:1 541~2 532 nm。故该双单管探测宽光谱微型近红外光谱仪的光谱探测范围为:800~2 532 nm。

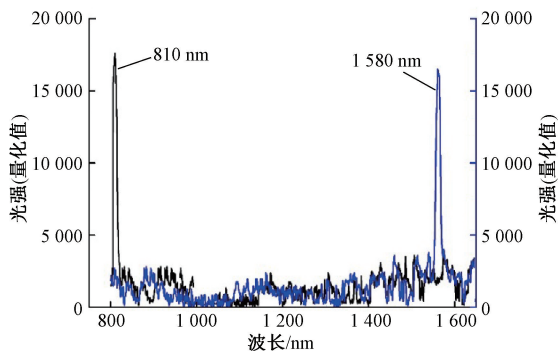


图 8 探测器 1 的光谱范围

Fig. 8 The spectrum range of detector 1

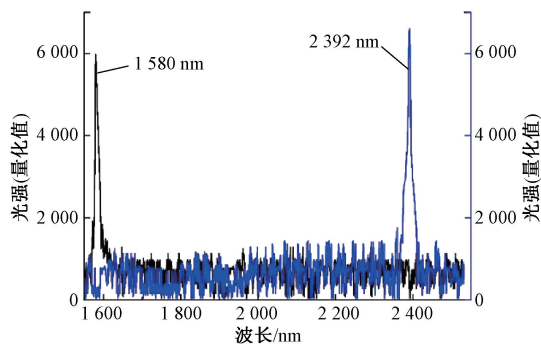


图 9 探测器 2 的光谱范围

Fig. 9 The spectrum range of detector 2

由于高压汞灯在近红外长波 (1800~2 500 nm) 范围内无相隔很近的两个特征峰,故选用窄带滤光片测试系统分辨率。

图 10 为探测器 1 的分辨率测试结果。由于有中心波长分别为 1 570 nm 和 1 580 nm 的窄带滤色片,故选取两个窄带滤光片测试 800~1 600 nm 范围内的分辨率,从图中可以看出 1 570 nm 和 1 580 nm 两个特征峰基本能够分开,且一般情况下光谱探测范围中心区域的分辨率均优于光谱探测范围两端的分辨率,故探测器 1 (800~1 646 nm) 的光谱分辨率整体优于 12 nm。

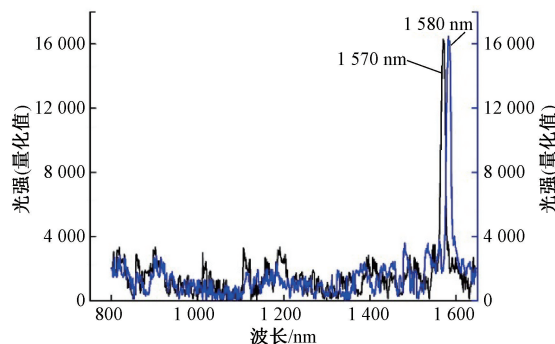


图 10 探测器 1 分辨率测试

Fig. 10 The testing of resolution of detector 1

图 11 为探测器 2 的分辨率测试结果。由于在 1 600~2 500 nm 范围内无中心波长相隔 15 nm 以内的窄带滤色片,故选取中心波长为 2 392 nm 的窄带滤光片,采用半高宽方法进行测试。测试中获取中心波长为 2 392 nm 的窄带滤光片的半高宽为 17 nm (2 399.2~2 382.5=16.7 nm)。同理,一般情况下光谱探测范围中心区域的分辨率均优于光谱探测范围两端的分辨率,因此探测器 2 (1 541~2 532 nm) 的光谱分辨率整体优于 17 nm。

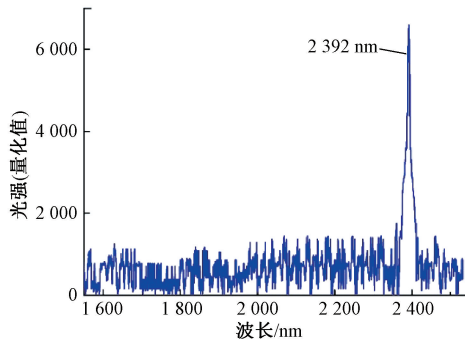


图 11 探测器 2 分辨率测试

Fig. 11 The testing of resolution of detector 2



## 5 结 论

本文设计了基于集成扫描光栅微镜的双探测器微型近红外光谱仪。光学系统采用非对称非交叉 C-T 系统,建立了理论模型,并采用 ZEMAX 软件开展了结构参数优化设计,完成了系统设计加工与装调测试。该双探测器微型近红外光谱仪工作波长范围:800~2 532 nm,分辨率:小于 12 nm(800~1 600 nm)、小于 17 nm(1 600~2 532 nm),整体尺寸:145 mm×135 mm×75 mm,该仪器具有光谱范围宽、体积小、成本低等优势。

### 参考文献

- [ 1 ] BLANCO M, MASPOCH S, VILLARROYA I, et al. Geographical origin classification of petroleum crudes from near-infrared spectra of bitumens [ J ]. Applied Spectroscopy, 2001, 55(7): 834-839.
- [ 2 ] ASKARI M S, CUI J, O'ROUKE S M, et al. Evaluation of soil structural quality using VIS-NIR spectra [ J ]. Soil and Tillage Research, 2015, 146: 108-117.
- [ 3 ] POREP J U, KAMMERER D R, CARLE R. On-line application of near infrared (NIR) spectroscopy in food production [ J ]. Trends in Food Science & Technology, 2015, 46(2): 211-230.
- [ 4 ] BLASCO J, LORENTE D, CORTES V, et al. Application of near infrared spectroscopy to the quality control of citrus fruits and mango [ J ]. NIR News, 2016, 27(7): 4-7.
- [ 5 ] CIRILLI M, BELLINCONTRO A, URBANI S, et al. On-field monitoring of fruit ripening evolution and quality parameters in olive mutants using a portable NIR-AOTF device [ J ]. Food Chemistry, 2016, 199: 96-104.
- [ 6 ] SUN H, PENG Y, LI P, et al. A portable device for detecting fruit quality by diffuse reflectance Vis/NIR spectroscopy [ C ]. Proc. of SPIE, 2017:102170T.
- [ 7 ] 张朕, 姜劲, 傅嘉豪, 等. 基于功能近红外光谱的多生理脑力疲劳检测 [ J ]. 仪器仪表学报, 2017, 38(6): 1345-1352.
- ZHANG ZH, JIANG J, FU J H, et al. Multi-physiological mental-fatigue detection based on the functional near infrared spectroscopy [ J ]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(6): 1345-1352.
- [ 8 ] 戴峰, 常建华, 房久龙, 等. 差频产生中红外光源及甲烷气体光谱检测 [ J ]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(9): 1447-1452.
- DAI F, CHANG J H, FANG J L, et al. Mid infrared light source based on difference frequency generation and detection of methane gas spectrum [ J ]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2017, 31(9): 1447-1452.
- [ 9 ] GRUEGER H, WOLTER A, SCHUSTER T, et al. Realization of a spectrometer with micromachined scanning grating [ C ]. International Society for Optics and Photonics, 2003, 46-53.
- [ 10 ] GRUGER H, WOLTER A, SCHENK H, et al. Performance and applications of a spectrometer with micromachined scanning grating [ J ]. Proc. of SPIE, 2003, 4987: 284-291.
- [ 11 ] ZIMMER F, GRUEGER H, HEBERER A, et al. Development of a NIR microspectrometer based on a MOEMS scanning grating [ C ]. Proc. of SPIE, 2004, 5455: 9-18.
- [ 12 ] ZISSIS G J. Dispersive prisms and gratings [ J ]. Handbook of Optics, 1995, 2(5): 1-5.
- [ 13 ] FISCHER R E, TADIC-GALEB B, YODER P R, et al. Optical system design [ M ]. New York: McGraw Hill, 2000.
- [ 14 ] 李晓彤, 岑兆丰. 几何光学. 像差. 光学设计 [ M ]. 杭州: 浙江大学出版社, 2006.
- LI X T, CEN ZH F. Geometrical optics, aberrations and optical design [ M ]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006.
- [ 15 ] ZHOU Y, WEN Q, WEN Z Y, et al. Modeling of MOEMS electromagnetic scanning grating mirror for NIR micro-spectrometer [ J ]. AIP Advances, 2016, 6(2): 025025.
- [ 16 ] ZHOU Y, WEN Q, WEN Z Y, et al. An electromagnetic scanning mirror integrated with blazed grating and angle sensor for a near infrared micro spectrometer [ J ]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2017, 27(12): 125009.
- [ 17 ] GEARY J M. Introduction to lens design: With practical ZEMAX examples [ M ]. Richmond: Willmann-Bell, 2002.





## 作者简介



**周颖** (通信作者), 2018 年于重庆大学获得博士学位, 现为重庆川仪自动化股份有限公司高级工程师, 主要研究方向为微纳器件和实验室科学仪器。

E-mail: zhouying@163.com

**Zhou Ying** (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Chongqing University in 2018. He is currently a senior engineer at Chongqing Chuanyi Automation Co., Ltd. His main research interests include micro/nano device and scientific instruments.

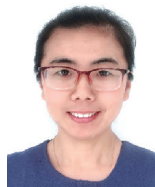


**黄云彪**, 硕士, 正高级工程师, 现为重庆川仪自动化股份有限公司首席专家, 技术中心主任。主要研究方向为信号检测与处理, 自动控制及嵌入式系统。

E-mail: hybmail@163.com

Huang Yunbiao has M. Sc. degree and is a professor-level senior engineer. He is the director of technical center at Chongqing Chuanyi Automation Co., Ltd., His main research

interests include Signal detection and processing, automatic control and embedded system.



**李东玲**, 2016 年于重庆大学获得博士学位, 现为重庆大学高级工程师, 主要研究方向为微纳器件设计与加工工艺。

E-mail: lidongling@cqu.edu.cn

**Li Dongling** received her Ph. D. degree from Chongqing University in 2016. She is a senior engineer at Chongqing University. Her main research interests include design and processing technology of micro/nano device.



**温泉**, 2015 年于德国开姆尼兹大学获得博士学位, 现为重庆大学研究员, 主要研究方向为微纳器件及系统。

E-mail: hotspring1945@gmail.com

**Wen Quan** received his Ph. D. degree from University of Chemnitz in 2015. He is currently a research fellow at Chongqing University. His main research interests include micro/nano device and system.