

文章编号 1004-924X(2015)12-3295-08

光栅-平面镜型可调式空间外差光谱仪

巴音贺希格^{1*}, 李涛涛^{1,2}, 潘明忠¹, 崔继承¹, 王 玮^{1,2}, 李晓天¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 101408)

摘要:针对空间外差光谱技术测量光谱范围较窄(10 nm 左右), 制约其应用范围的问题, 提出了一种光栅-平面镜结构的可调式空间外差光谱仪系统。该系统将传统的双平面光栅式空间外差光谱仪中的一块光栅换成平面镜, 让另一块光栅可旋转来组成可调式结构; 通过旋转光栅切换测量波段, 展宽其测量范围; 对平面镜施加微小俯仰角以确保谱图还原的单值性; 从而拓展了仪器的应用范围。搭建了原理样机并对其性能进行了实验验证。结果表明, 设计的仪器的光谱范围达到了 100 nm 左右, 分辨率优于 0.29 nm。该仪器结构简单, 光栅制作难度低, 易于实现谱图还原。另外, 通过增加光栅旋转切换次数和引入抑制杂光措施等手段, 还可进一步展宽波段范围, 提高系统光谱分辨率。

关键词:空间外差光谱术; 宽波段外差光谱术; 光谱仪; 高光谱分辨率; 光栅色散; 光栅-平面镜型

中图分类号:TH744.1; TH744.3 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152312.3295

Tunable spatial heterodyne spectroscopy with grating-mirror structure

Bayanheshig^{1*}, LI Tao-tao^{1,2}, PAN Ming-zhong¹, CUI Ji-cheng¹, WANG Wei^{1,2}, LI Xiao-tian¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China)

* Corresponding author, E-mail: bayin888@sina.com

Abstract: As Spatial Heterodyne Spectroscopy (SHS) technology has a narrower spectral bandpass (about 10 nm) and its applications are restricted generally, this paper proposes a tunable SHS with a grating-mirror structure to widen the application ranges of the spectrometer. The tunable structure in the spectrometer is implemented by taking a plane mirror to replace a grating in the traditional double grating SHS system, meanwhile allowing another grating to rotate. It switches measuring band to broaden measurement range and applies a small pitching angle on the plane mirror to ensure the monodromy of the recover spectra, by which the application ranges of the spectroscopy are expanded. A prototype is established to verify the feasibility of the proposed SHS. The experiment result shows that the designed SHS has the bandpass range up to about 100 nm and its spectral resolution is better than 0.29 nm. The spectrometer has a simple structure and its grating production and spectral reduction are easy to be implemented. Moreover, by increasing the rotated times of the grating and introdu-

收稿日期:2015-07-14; **修订日期:**2015-08-13.

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(No. 61505204); 国家重大科学仪器设备开发专项资助项目(No. 2014YQ120351, No. 2011YQ120023); 国家重大科研装备研制项目(No. ZDYZ2008-1); 吉林省科技发展计划资助项目(No. 20140203011GX)

cing methods to eliminate stray light *etc*, it will expand the its bandpass farther and improve the spectral resolution.

Key words: spatial heterodyne spectroscopy; broadband bandpass spectroscopy; spectrometer; high spectral resolution; grating dispersion; grating-mirror structure

1 引言

空间外差光谱技术是一种新型的傅里叶变换光谱技术,其原理如下:将迈克尔逊干涉仪中的两块固定平面镜换成两块光栅,入射光经准直分束后由光栅色散,色散后的两光束在空间上形成干涉,干涉图由面阵探测器接收,干涉条纹的空间频率为波数的函数,对干涉条纹进行傅里叶变换即可获得入射光的光谱信息。自 1991 年 J. Harlander 等人研制出空间外差光谱仪(Spatial Heterodyne Spectrometer, SHS)实验样机^[1]后,空间外差光谱技术得到了快速发展。美国利用空间外差光谱技术进行了大气遥感探测^[2]及北美星云探测^[3]。加拿大航天局借助大气层水汽空间外差观测系统项目对大气水汽进行了监测^[4]。在国内,中科院安徽光机所于 2006 年和 2010 年分别研制了可见光和近红外 SHS,用于测量大气中的二氧化碳和水汽浓度^[5-6]。2014 年, Igor B. Gornushkin 等人^[7]首次将空间外差光谱技术应用到激光诱导解离光谱技术(LIBS)中,扩大了空间外差光谱技术的应用范围。SHS 的探测光谱范围取决于探测器所能探测的最高空间频率,传统的 SHS 的测量范围小于 10 nm^[8],这极大地制约了仪器的探测能力和应用范围。因此,开展宽谱段 SHS 的研制成为该领域的热点。

国外提出的宽波段 SHS 主要构型分为全反结构式和中阶梯光栅式两种类型^[9]。全反结构式的特点是将对称闪耀光栅用作分束器、合束器和色散元件,并通过光栅、平面反射镜和屋脊棱镜构成三角共光路结构,此结构通过旋转反射镜角度来控制系统的 Littrow 波长,以实现测量波段的展览。美国 Davis 大学在美国国家航空航天局(NASA)的资助下研制了用于 Coudé Auxiliary Telescoping(CAT)望远镜的全反结构式空间外差光谱仪^[8]。中阶梯光栅式的特点是利用两块中阶梯光栅替换传统的平面光栅,利用其多级衍射同时形成多级干涉,每个衍射级次的干涉图均有一

个 Littrow 波长和一个测量光谱范围,通过合理选取衍射级次及波段,可同时实现宽波段和高分辨率的光谱测量^[9]。美国海军实验室空间科学部研制了长波红外中阶梯光栅式 SHS^[10],既可用于检测固体、液体或气体样品,又可对无机物、有机物等进行定性或定量分析。美国 Wisconsin 大学物理学院也在开展中阶梯光栅式宽波段 SHS (Mark1, Mark2)的研制^[11],主要用于实验室天体物理的研究,也用来替换 Stoughton 同步辐射中心的真空中阶梯光栅光谱仪。在国内,中科院西安光机所正在进行此方面的研究工作^[9]。上述结构的 SHS 对光栅的性能要求高,其中对称闪耀光栅的制作难度大,而中阶梯光栅的制作则对光栅刻划机的精度要求极高。另外,中阶梯光栅式 SHS 的工作原理与中阶梯光栅光谱仪类似^[12-13],衍射级次重叠的分离及选取复杂,谱图还原算法难度较大。

本文提出了一种光栅-平面镜型可调式 SHS,将传统的双平面光栅式 SHS 中一块光栅换成平面镜,让另一块光栅可旋转,组成一个可调式系统。通过旋转切换光栅角度选取波段以展览测量范围,对平面镜施加微小俯仰角以确保谱图还原的单值性。该仪器结构简单、光栅制作难度低、谱图还原算法易于实现,是一种新型的宽谱段 SHS。

2 传统空间外差光谱仪的改进

2.1 空间外差光谱仪原理

传统的 SHS 结构如图 1 所示。光栅设置偏角为 θ_L ,当入射光为 Littrow 波长 λ_0 (对应波数为 $\sigma_0, \sigma_0 = 1/\lambda_0$)时,经过两光栅衍射后出射光与光轴相互平行,相位差为零,故无干涉条纹^[8],如图 2(a)所示。当入射光为非 Littrow 波长 λ (对应波数为 $\sigma, \sigma = 1/\lambda$)时,经光栅衍射后传播方向与光轴有一小夹角 γ ,两光栅的光栅方程^[1]为:

$$\sigma(\sin \theta_L + \sin(\theta_L \pm \gamma)) = m/d, \quad (1)$$

式中: d 为光栅常数, m 为衍射级次,一般取 1 级。两光栅衍射后的出射光经过分束器后夹角为 2γ ,

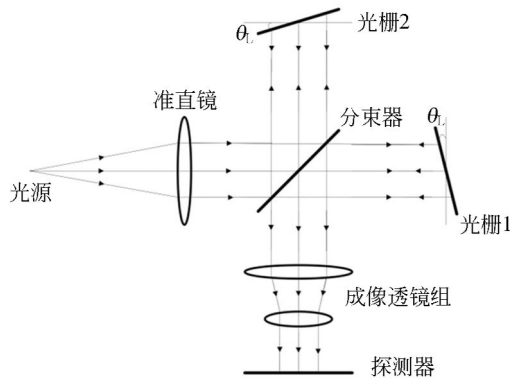


图 1 空间外差光谱仪的结构原理图

Fig. 1 Schematic diagram of basic Spatial Heterodyne Spectrometer (SHS)

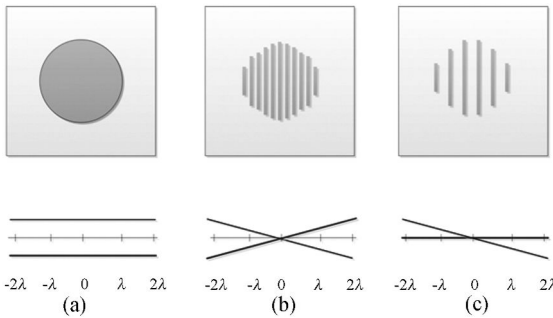


图 2 不同出射波前与其在探测器上的干涉条纹。(a) 为 Littrow 波长输出图形; (b) 为双光栅非 Littrow 波长输出图形; (c) 为光栅-平面镜结构非 Littrow 波长输出图形

Fig. 2 Different wavefronts and corresponding Fizeau fringes on detector. (a) is output at Littrow wavelength; (b) is output of double-grating without Littrow wavelength; (c) is output of grating-mirror without Littrow wavelength

两束出射光叠加形成干涉条纹, 如图 2(b) 所示。干涉条纹的空间频率为波数的函数^[1], 即:

$$f_x = 2\sigma \sin \gamma \approx 4(\sigma - \sigma_0) \tan \theta. \quad (2)$$

当入射光为复色光 $B(\sigma)$ 时, 干涉图表示为:

$$I(x) = \int_0^\infty B(\sigma) [1 + \cos(2\pi f_x x)] d\sigma. \quad (3)$$

对干涉图进行傅里叶变换即可得到入射光谱信息。

SHS 的分辨能力取决于两干涉光束的光程差^[5]。干涉图的最大光程差 $\Delta U = 2W \sin \theta_L$, 其中 W 为光栅有效宽度。由采样定理可得光谱分辨

能力 R 为:

$$\delta\sigma = \frac{1}{2\Delta U} = \frac{1}{4W \sin \theta_L}, \quad (4)$$

$$R = \frac{\sigma}{\delta\sigma} = 2W \cdot \frac{1}{d}. \quad (5)$$

由式(4)可以看出, SHS 的分辨能力取决于光栅的分辨本领, 它等于两光栅分辨能力之和。在其他条件一定时, 增加光栅刻线密度或加大入射光的光束口径均可增加系统的光谱分辨率。

光谱范围由 Littrow 波数及其两侧的波段宽度决定^[14]。由光栅方程可知, Littrow 波数由光栅偏角决定。根据采样定理, 若 SHS 的光谱范围为 $\sigma_0 \pm \Delta\sigma$, 则需满足两个条件: (1) 光程差采样的空间频率大于最大波数差 $\Delta\sigma$; (2) 充足的采样点数 $N_x \geq 2\Delta\sigma / \delta\sigma$ 。当第一个条件满足时, SHS 的光谱范围主要由探测器的采样点数量决定, 即:

$$\Delta\sigma = \frac{N_x}{2} \cdot \delta\sigma. \quad (6)$$

当系统的光谱分辨率一定时, 增加探测器的采样点数可以加大光谱范围。

2.2 光栅-平面镜型可调式空间外差光谱仪

图 3 所示为光栅-平面镜型可调式 SHS 结构图。此结构中光栅可以在色散方向(水平)转动以切换测量波段, 每次切换后工作原理与传统双光栅结构类似, 区别在于平面反射镜的出射光方向不随入射波长变化。当入射光为非 Littrow 波长 λ 时, 经过光栅衍射后出射光之间的夹角由双光栅时的 2γ 变为 γ , 如图 2(c) 所示。此时系统的最大光程差和干涉条纹空间频率降为原来的一半, 即 $f_x \approx 2(\sigma - \sigma_0) \tan \theta$ 。由式(4)、式(5)可知, 此

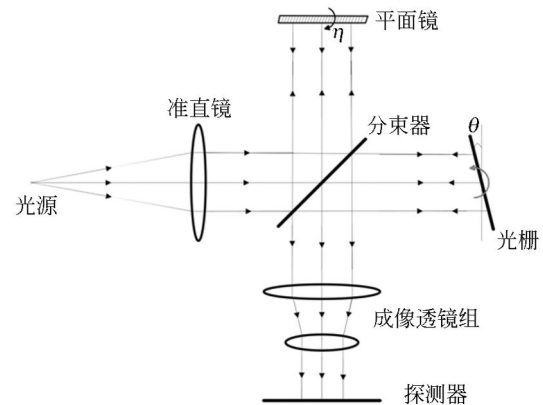


图 3 光栅-平面镜型空间外差光谱仪的结构原理图

Fig. 3 Schematic diagram of G-M SHS

时系统的光谱分辨率会下降一半。为保证系统的原光谱分辨率,需将光栅刻线密度增加一倍或将系统的通光口径增加一倍。

复色光 $B(\sigma)$ 的干涉图表达式亦如式(3)所示,由于式(3)中余弦函数的对称性,在 Littrow 波长附近的关于 Littrow 波数对称($\sigma_1 - \sigma_0 = \sigma_0 - \sigma_2$)的两个人射光所产生的干涉图是一样的,这就导致了谱图还原时的多值性问题。解决这种问题的方法主要有两种:其一是安装截止滤光片,截止波长为 Littrow 波长,使得大于或小于 Littrow 波长的波段被截止^[5]。这种方法简单方便,然而却牺牲了 SHS 的测量范围,与最初的设计目的矛盾;另一种方法则是在垂直于色散方向上引入一个小的空间频率调制,这样会使 Littrow 波长两端的入射光所形成的干涉图沿着不同方向旋转,从而确保谱图还原时的单值性^[15]。本文采用后一种方法,具体做法是对平面反射镜施加一个微小俯仰角 η ,此时复色光 $B(\sigma)$ 的干涉图表达式为:

$$I(x) = \int_0^{\infty} B(\sigma) \times \{1 + \cos[2\pi(f_x x + 2\sigma y)]\} d\sigma. \quad (7)$$

由式(7)可以看出,俯仰角 η 使得干涉条纹在垂直于色散方向上的频率调制与入射光波数直接相关,即 $f_y = 2\sigma\eta$,将导致 $\sigma > \sigma_0$ 的干涉图顺时针旋转;而 $\sigma < \sigma_0$ 的干涉图则逆时针旋转,其对应的傅里叶变换谱图也由一维变为二维,即可根据对应坐标位置清除不确定性,保证了谱图还原的单值性。

2.3 系统设计

根据系统的总体设计要求,仪器的波段为 465~560 nm,分辨能力 $R=7\ 800$ 。根据式(1)、式(5)和式(6)选取的系统关键元件如下:光栅刻线密度为 600 gr/mm,则通光口径或光栅有效宽度为 13 mm;分束器采用 1:1 分光的立体分束棱镜;CCD 相机的面阵大小为 $1\ 024 \times 1\ 024$,像元尺寸为 $13\ \mu\text{m}$ 。单次测量的光谱范围则根据其两个决定条件计算,分别约为 40 nm 和 65 nm,故单次测量的光谱范围将小于 40 nm。再考虑式(2)的近似性,可将整个光谱范围分为 4 段,具体光栅各次 Littrow 角及光谱范围如表 1 所示。为保证图谱还原的单值性,取 $\eta=0.02^\circ$ 。

对公式 $d(\sin \theta_L + \sin \theta_L) = m\lambda$ 求导可得 $d\lambda = 2d\cos \theta_L \cdot d\theta$ 。由 $m=1$ 、 $d=1/600\ \text{mm}^{-1}$ 、

$\cos \theta_L = 0.98$ 可知,当 $d\lambda$ 约为 1 nm 时, $d\theta$ 约为 $1'$,即光栅转角误差在 $1'$ 时,中心波长误差在 1 nm 左右。对于可调式 SHS,每次旋转后都需要对仪器的中心波长进行标定。

表 1 单次测量时 Littrow 波长、Littrow 角及其光谱范围
Tab. 1 Littrow wavelength, Littrow angle and its bandpass for single measurement

Littrow 波长/nm	Littrow 角/(°)	光谱波段/nm
475	8.19°	463~488
500	8.63°	488~514
527	9.10°	514~540
550	9.50°	537~564

2.4 模拟仿真

对上述结构参数的 SHS 进行 Zemax 仿真,主要验证单次测量时的光谱范围及小角度 η 使 Littrow 波长两端对称位置波长的干涉图沿不同方向旋转。Zemax 中以非序列模式建立系统光路图,如图 4 所示。点光源经准直透镜组后变为平行光,通过光阑后经立体分束棱镜 1:1 分光后分别入射到光栅与平面镜上。经光栅衍射后的光与平面镜反射光再次经过分束棱镜后形成干涉,干涉条纹被探测器接收。

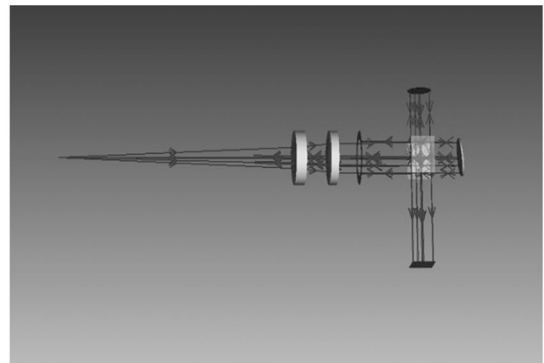
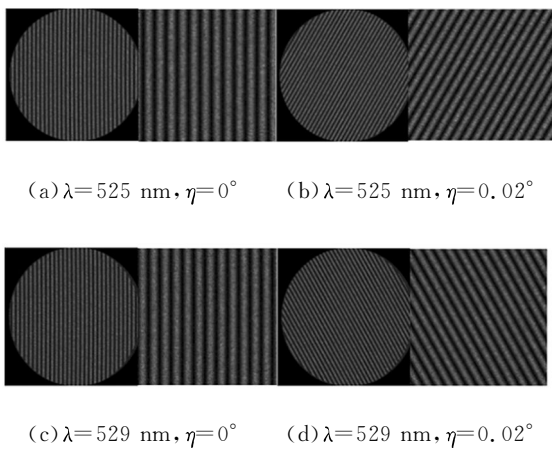


图 4 Zemax SHS 光路图

Fig. 4 Optical design of SHS in Zemax

以 527 nm Littrow 波长为例,分别计算 $\lambda=(527 \pm 2)\ \text{nm}$,倾角 $\eta=0^\circ, 0.02^\circ$ 时探测器所接收到的干涉图,结果如图 5 所示。对比图 5(a)、(c)可以看出,波数对称的入射光的干涉图相同(这里取的是波长对称),无法确定入射波长 $\lambda=525\ \text{nm}$ 还是 $\lambda=529\ \text{nm}$ 。而由图 5(b)、(d)可以看出由

于 η 不为零, Littrow 波长左右的入射光的干涉图会沿着不同方向旋转, 解决了干涉图多值性的问题。由式(2)可知, 入射光波长越偏离 Littrow 波长, 干涉条纹越加密集。计算可知 $\lambda_0 = 527 \text{ nm}$ 时, λ 为 514, 540 nm 的干涉条纹周期分别为 65.0, 68.3 μm 。对应的模拟干涉图放大后可以看出: 此时一个干涉周期内有 5, 6 个像元, 可以完整记录干涉条纹信息。若继续增加测量范围, 则探测器记录的干涉条纹信息将不再精确。故单次测量的光谱波段以 514~540 nm 为最佳。



(a) $\lambda=525 \text{ nm}, \eta=0^\circ$ (b) $\lambda=525 \text{ nm}, \eta=0.02^\circ$

(c) $\lambda=529 \text{ nm}, \eta=0^\circ$ (d) $\lambda=529 \text{ nm}, \eta=0.02^\circ$

图 5 全视场干涉图及其局部放大图

Fig. 5 Interference images and its enlarged views

3 实验验证及结果

本文搭建了 SHS 原理样机并对其性能进行了实验验证。立体分束棱镜使用 Newport 公司的 10BC17MB.1 消偏振分光棱镜, 平面反射镜为 Newport 公司的 3MD20AL. 2, 光栅使用中科长春光机所光栅室生产的 R11-048 号平面刻划光栅, 探测器使用安道尔的 iKon-M934CCD 相机。具体参数如表 2 所示。

实验选择 473, 532 nm 的激光器以及汞灯 (546 nm) 作为测试光源, 根据表 1, Littrow 角分别取 8.19°, 9.10° 和 9.50°, 测得的干涉图分别如图 6、图 7 所示。

根据图 6、图 7 中所示结果可以看出, 激光器的干涉图条纹清晰, 而汞灯干涉条纹的对比度较低, 其原始数据需进行预处理后才能通过傅里叶变换复原光谱。

3 种不同波长光源干涉图的傅里叶变换结果

表 2 SHS 主要元件的结构参数

Tab. 2 Configuration parameters of major components in SHS

元件名称	参数	量值
光栅	刻线密度/(gr · mm ⁻¹)	600
	闪耀波长/nm	430
平面镜	尺寸/mm	40 × 40
	直径/mm	30
	光谱波段/nm	250~600
分束棱镜	分光比	1 : 1
	光谱波段/nm	400~700
	尺寸/mm	25.4 × 25.4 × 25.4
扩束器	光谱波段/nm	400~650
	最大出射直径/mm	28
	像元尺寸/ μm	13
探测器	规格	1 024 × 1 024
	光谱波段/nm	200~1 100

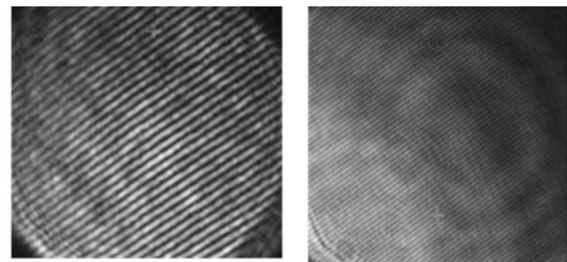


图 6 激光干涉图(左图 473 nm, 右图 532 nm)

Fig. 6 473 nm(left), 532 nm(right) laser interference images

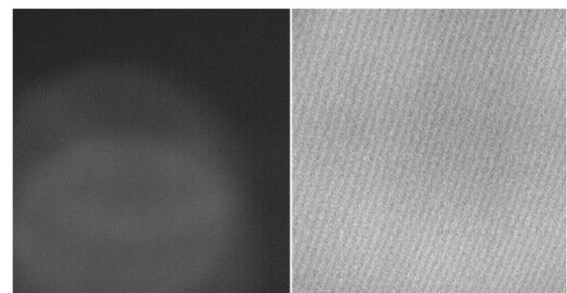


图 7 汞灯干涉图及其局部放大图(546 nm)

Fig. 7 546 nm mercury lamp interference image and its enlarged view

如图 8 所示, 对应的复原光谱如图 9 所示。其中, 图 8(a)、(b) 中的三维谱图是截取整个变换矩阵 (1 024 × 1 024) 中心处 (200 × 200) 的放大图。图 8(c) 中汞灯干涉图是取条纹较好的 128 × 128 像元的图像进行二维傅里叶变换及去直流处理后得到的。

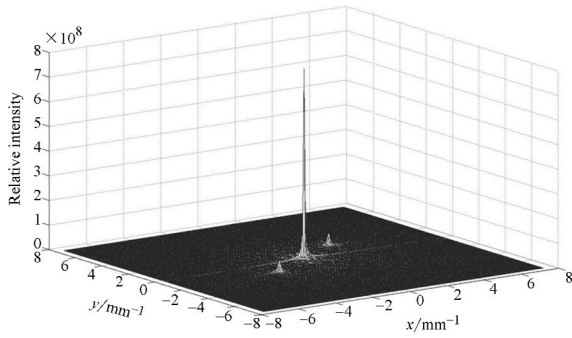
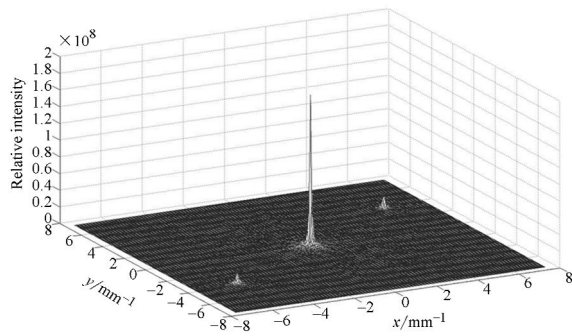
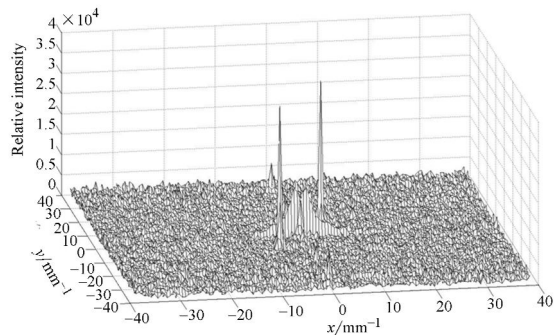
(a) $\lambda=473$ nm(b) $\lambda=532$ nm(c) $\lambda=546$ nm

图 8 干涉图的傅里叶变换

Fig. 8 FFT of interference images

复原光谱图中峰值坐标分别为 473.12, 532.19, 546.37 nm, 半高全宽分别为 0.138, 0.136, 0.29 nm。峰值的偏移可以归结为转角设置时的误差, 即 Littrow 角度的误差^[16]。因此可以使用已知波长的入射光标定 SHS, 计算出 Littrow 角的准确值。3 次测量的理论分辨率分别为 0.061, 0.068 和 0.070 nm。由于谱图还原时切趾函数使理论分辨率有所降低, 分别约为 0.121, 0.130 和 0.137 nm。两激光干涉图的实际分辨率为 0.138, 0.136 nm 与理论设计值比较符合, 而汞灯分辨率为 0.29 nm 与理论值相差较大。其

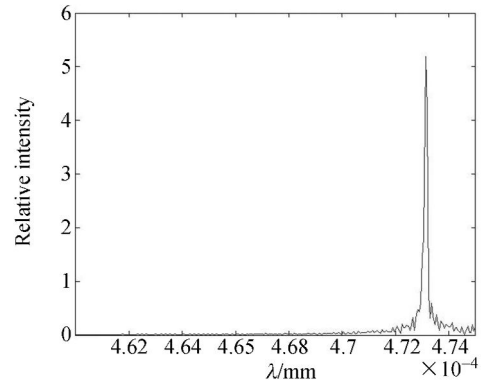
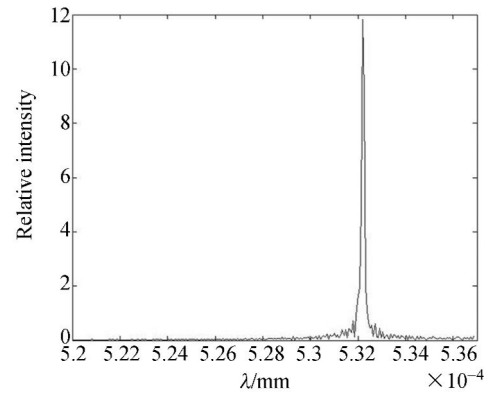
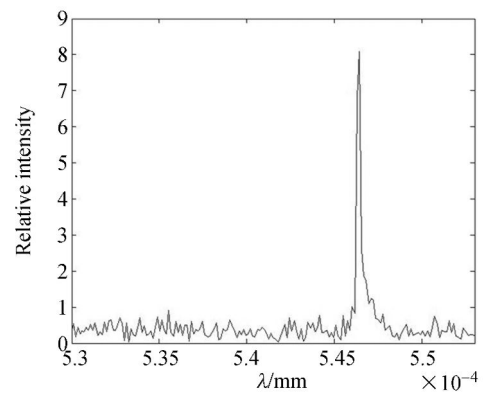
(a) $\lambda=473$ nm(b) $\lambda=532$ nm(c) $\lambda=546$ nm

图 9 各波长入射光复原光谱图

Fig. 9 Recover spectra at different wavelengths

原因一是光栅衍射效率低导致两束出射光光强相差较大引起条纹对比度降低; 二是未考虑汞灯其他谱线影响, 导致平面镜反射光中含有 577, 579 nm 汞灯的杂光谱线, 部分干涉图被杂光覆盖, 谱图还原时选取的像元矩阵减小造成光谱分辨率降低。由图 9 可看出汞灯噪声较大。尽管如此, 3 次测量均可准确测出入射光谱。

单次测量范围除了通过 Zemax 模拟验证,还可以通过二维傅里叶变换图中的坐标估算。随着波长远离 Littrow 波长,其对应的傅里叶变换光谱也远离中心点。以 473 nm 激光为例,傅里叶变换图中(513,513)点代表零频量,即 475 nm 波长;(493,481)代表已测量的 473 nm 波长;而(493,307)、(494,728)分别表征 463 nm 波长和 488 nm 波长。可以看到 463~488 nm 并未超出二维傅里叶变换图,以此估算单次测量可以覆盖 463~488 nm 波段,满足设计要求。

4 结 论

本文设计了一种光栅-平面镜型可调式 SHS,

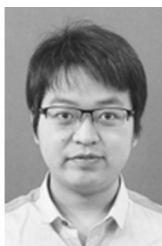
搭建了原理样机并对其性能进行了实验验证。该系统通过旋转光栅可以展宽测量波段范围,原理样机的测量范围可达 100 nm,分辨率优于 0.29 nm。对平面镜施加不大于 0.1°的微小俯仰角可清除傅里叶变换后的不确定性,确保谱图还原的单值性。对于汞灯光谱而言,由于光栅与平面镜的出射光强度相差较大,导致条纹对比度低,可选取宽波段高衍射效率平面光栅予以解决;平面镜的反射杂光对干涉图有影响,可加前置带通滤光片予以解决。根据上述原理,通过增加光栅转角切换次数和抑制杂光手段,可进一步拓宽光谱测量范围、提高光谱分辨率。

参考文献:

- [1] ROESLER F L, HARLANDER J. Spatial heterodyne spectroscopy: interferometric performance at any wavelength without scanning[C]. *Spectroscopy '90*, 4-6 June, Los Cruces International Society for Optics and Photonics, 1990:234-243.
- [2] HARLANDER J, ROESLER F L, CARDON J G, et al. SHIMMER: a spatial heterodyne spectrometer for remote sensing of Earth's middle atmosphere[J]. *Applied Optics*, 2002, 41(7):1343-1352.
- [3] MIERKIEWICZ E J, ROESLER F L, HARLANDER J, et al. First light performance of a near-UV spatial heterodyne spectrometer for interstellar emission line studies[J]. *SPIE*, 2004, 5492: 751-766.
- [4] BUTCHER H, DOUGLAS N, FRANDBSEN S, et al. A practical non-scanning FTS for astronomy. High resolution Fourier transform spectroscopy[J]. *OSA Technical Digest Series*, 1989, 6:9-12.
- [5] 叶松, 方勇华, 洪津, 等. 空间外差光谱仪系统设计[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(6):959-964.
YE S, FANG Y H, HONG J, et al. System design of spatial heterodyne spectrometer[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(6):959-964. (in Chinese)
- [6] 熊伟, 施海亮, 汪元钧, 等. 近红外空间外差光谱仪及水汽探测研究[J]. *光学学报*, 2010(5):1511-1514.
XIONG W, SHI H L, WANG Y J, et al. Study on near-infrared spatial heterodyne spectrometer and detection of water vapor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010(5):1511-1514. (in Chinese)
- [7] GORNUSHKIN I B, SMITH B W, PANNE U, et al. Laser-induced breakdown spectroscopy combined with spatial heterodyne spectroscopy[J]. *Applied Spectroscopy*, 2014, 68(9): 1076-1084.
- [8] HOSSEINI S S, GONG A, RUTH D, et al. Tunable Spatial Heterodyne Spectroscopy (TSHS): a new technique for broadband visible interferometry[C]. In: *SPIE Astronomical Telescopes+ Instrumentation: International Society for Optics and Photonics*, 2010: 77343J-77343J-77312.
- [9] FENG Y, BAI Q, YAN P, et al. Experimental research for broadband spatial heterodyne spectroscopy[C]. *Photonics Asia 2010 International Society for Optics and Photonics*, 2010:78501U-78501U-8.
- [10] ENGLERT C R, BABCOCK D D, HARLANDER J M. Spatial heterodyne spectroscopy for long-wave infrared: first measurements of broadband spectra[J]. *Optical Engineering*, 2009, 48(10):105602-105609.
- [11] HARLANDER J M, LAWLER J E, CORLISS J, et al. First results from an all-reflection spatial heterodyne spectrometer with broad spectral coverage[J]. *Optics Express*, 2010, 18(6): 6205-6210.
- [12] 唐玉国, 宋楠, 巴音贺希格, 等. 中阶梯光栅光谱仪的光学设计[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(9): 1989-1995.
TANG Y G, SONG N, BAYANHESHIG, et al. Optical design of cross-dispersed echelle spectrograph[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(9): 1989-1995. (in Chinese)

- [13] 唐玉国,陈少杰,巴音贺希格,等. 中阶梯光栅光谱仪的谱图还原与波长标定[J]. 光学精密工程, 2010,18(10):2130-2136.
TANG Y G, CHEN SH J, BAYANHESHIG, *et al.*. Spectral reducing of cross-dispersed echelle spectrograph and its wavelength calibration [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18 (10): 2130-2136. (in Chinese)
- [14] 冯玉涛,孙剑,李勇,等. 宽谱段空间外差干涉光谱仪[J]. 光学精密工程,2015,23(1):48-55.
FENG Y T, SUN J, LI Y, *et al.*. Broad-band spatial heterodyne interferometric spectrometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(1): 48-55. (in Chinese)
- [15] HARLANDER J M, ROESLER F L, CHAKRABARTI S. . Spatial heterodyne spectroscopy: A novel interferometric technique for the FUV[C]. *In: San Diego-DL Tentative: International Society for Optics and Photonics*, 1990: 120-131.
- [16] 杨勇,熊伟,叶擎昊,等. 空间外差光谱仪的平场波长定标实验与数据处理[J]. 光学精密工程, 2013,21(10):2508-2512.
YE Y, XIONG W, YE Q H, *et al.*. Experiments of flat-field wavelength calibration of spatial heterodyne spectrometer and its data processing [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(10): 2508-2512. (in Chinese)

作者简介:



李涛涛(1990—),男,湖北襄阳人,硕士研究生,2013年于华中科技大学获得学士学位,主要从事光学设计及光谱仪器研制方面的研究。E-mail: litao-tao2516@163.com

导师简介:



巴音贺希格(1962—),男,内蒙古鄂尔多斯人,博士,研究员,博士生导师,2004年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事光栅理论、光栅制作技术及光谱技术的研究。E-mail: bayin888@sina.com

(版权所有 未经许可 不得转载)