

文章编号: 0258-7025(2003)05-0409-04

旋转光栅调制傅里叶变换频谱仪

林德教¹, 平井亚纪子², 松本弘一², 曾理江¹, 殷纯永¹

(¹ 清华大学精密仪器与机械学系精密测量技术与仪器国家重点实验室, 北京 100084)
² 日本国家产业技术综合研究所计量研究部门, 茨城县筑波 305-8563)

摘要 提出了一种基于圆盘旋转光栅调制的傅里叶变换光谱仪(FTS), 光栅同时实现了分束和外差调制的功能。分析了三种实现分光方案, 通过对三个波长分别为 670 nm, 633 nm 和 532 nm 的激光进行了频谱测量实验, 结果表明该光谱仪具有良好的稳定性和抗干扰能力, 经调制后测量灵敏度倍增 20 倍, 尤其适用于微弱信号测量和近红外领域。

关键词 光电子学; 傅里叶变换光谱仪; 旋转光栅; 外差调制

中图分类号 TH 744.1 **文献标识码** A

Fourier Transform Spectrometer Modulated by Rotary Grating

LIN De-jiao¹, HIRAI Akiko²,

MATSUMOTO Hirokazu², ZENG Li-jiang¹, YIN Chun-yong¹

(¹ State Key Laboratory of Precision Measurement Technology & Instruments,
Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China)
² National Institute of Advanced Industrial Science and Technology,
1-1-1 Umezono, Tsukuba, Ibaraki 305-8563, Japan)

Abstract Fourier transform spectrometer (FTS) modulated by means of rotary grating is developed in this paper. The grating simultaneously acts as a beam splitter and a heterodyne modulator. Three schemes to separate the light beams are analyzed. Three lasers with the wavelength of 670 nm, 633 nm and 532 nm respectively have been adopted to implement the measurement of spectrum. Experimental results show that this FTS takes advantage of favorable stability and strong ability of anti-disturbance. The sensitivity of measurement has been improved by 20 times with the modulation method. It is expected to be effective particularly in the domain of weak signal measurement and near infrared region.

Key words optoelectronics; Fourier transform spectrometer; rotary grating; heterodyne modulation

1 引言

频谱探测技术在监测大气污染、化学药品、微电子产品以及表面形貌分析等许多领域有着广泛的应用^[1~3]。现代工业的发展对光谱测量的抗干扰能力、测量分辨率和测量灵敏度等提出了更高的要求。傅里叶变换光谱仪(FTS)因为其对入射光的充分利用、高信噪比而在近年得到普遍重视^[3~6]。对微弱

信号进行探测以及在红外、近红外领域探测器噪声成为决定性因素时, 需要傅里叶变换光谱仪具有更高的测量灵敏度, 而外差调制则能很好地解决这一问题^[6,7]。

我们已研制出基于声光调制和平面光栅调制的傅里叶变换光谱仪并在工业中得到了应用^[8,9]。但将声光调制方法用于红外区域时, 因为透射元件难以制造而受到限制; 平面光栅调制则有由于光栅往

收稿日期: 2002-02-25; 收到修改稿日期: 2002-04-02

基金项目: 中日国际合作研究项目, 日本中小企业支援型研究开发基金资助。

作者简介: 林德教(1976—), 男, 清华大学精密仪器与机械学系博士生, 主要科研方向为激光技术与应用。E-mail: lindj99@mails.tsinghua.edu.cn

返移动使调制信号中断而无法实现连续测量的缺陷。为此,本文提出了基于圆盘旋转光栅调制^[10]的傅里叶变换光谱仪,可以同时实现测量灵敏度的倍增和连续调制。

2 工作原理

基于旋转光栅调制的傅里叶变换光谱仪如图 1 所示。白光光源为卤素灯(MHF-150F),经照相机镜头准直后成为平行光束,再由消色差透镜 Lens2 汇聚到光栅表面。采用了反射式相位光栅获得 ± 1 级衍射主极大,衍射光由两个对称分布的球面镜反射返回。其中球面镜 1 固定不动,球面镜 2 装在由压电陶瓷(PZT)驱动的工作台上,沿衍射光方向作扫描产生光程差,由球面镜 1,2 反射返回的光经过光栅第二次衍射后组合光形成测量信号,得到白光

干涉图。

为了便于找到白光零光程差的位置,借助了波长 633 nm 的 He-Ne 激光器和波长 670 nm 的 LD 抽运固体激光器(CL-1001)。两者调成共路后经透镜 Lens1 扩束,由分束器 BS1 反射与白光光束共路。另外,还使用了 532 nm 的 YAG 激光器(DPSS532),也调成与另两路激光共路,经光栅衍射后由两个固定不动的球面镜 3 和 4 反射返回,作为参考信号。参考光和测量光经过透镜 Lens2 后由分束器 BS2 反射,再通过分色镜 Dichroic Mirror 分开测量光和参考光,经探测器接收后送入锁相放大器(NF5610B),输出由八通道数字示波器(DL708)记录干涉图。由于参考信号也直接由光栅调制产生,与内置的固定频率的参考信号相比可以完全抵消光栅由于振动和栅距不均匀等带来的误差。

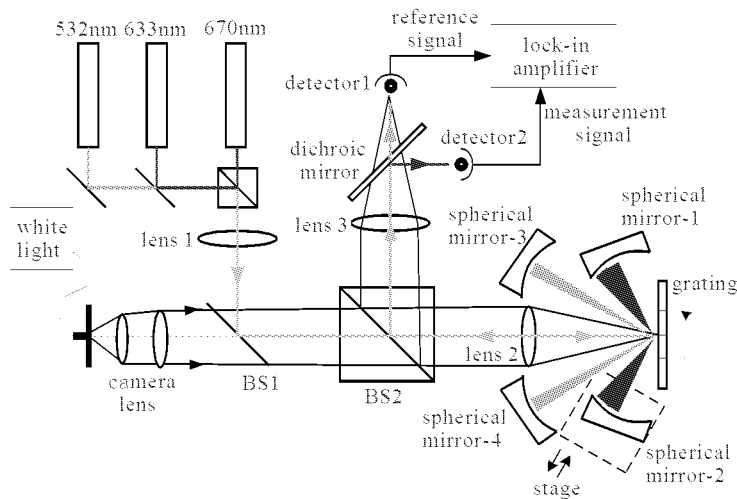


图 1 旋转光栅调制傅里叶变换光谱仪原理图

Fig. 1 Schematic of Fourier Transform Spectrometer modulated by rotary grating

圆盘光栅由旋转工作台 PH566-A 驱动绕圆心旋转,旋转的角速度为 ω 。所以光束透射点处光栅的线速度 $v = r\omega$,其中 r 为圆盘光栅的半径。

于是,光栅转动的调制频率 f 为

$$f = \frac{v \sin \theta}{\lambda} \quad (1)$$

其中 θ 为衍射角, λ 为光的波长。设光栅栅距为 d , m 为衍射级次,则由光栅方程 $d \sin \theta = m \lambda$, $m = 1$ 可知

$$\sin \theta = \lambda / d \quad (2)$$

联合式(1),(2)可得

$$f = \frac{v}{d} = \frac{r\omega}{d} \quad (3)$$

由式(3)可以看出,调制频率和波长无关。

对于特定波长的单频光,其干涉图为一正弦曲线,设光波长为 λ ,则对应干涉图的频率为 $\nu = \frac{2v_m}{\lambda}$,

其中 v_m 为动镜的移动速度。动镜由具有伺服反馈的压电陶瓷工作台驱动,在可见光和近红外区域其干涉图的频率在几十赫兹范围内。而光栅调制的频率可以达到几千赫兹,有效地避开了工频干扰和其他低频噪声。

频谱图由干涉图作 FFT 变换后得到,其分辨率 Δ_ν 取决于动镜的最大移动距离 z_{\max} ,关系式为

$$\Delta_\nu = \frac{1}{2z_{\max}} \quad (4)$$

由式(4)可知,为了提高频谱的测量分辨率,必

须尽量加大动镜的移动距离。但在图 1 所示的实验装置中,当球面镜 2 的扫描距离过大时,球面镜的球心离开光栅表面的影响就比较突出,会造成较大的测量误差。

如果采用抛物面镜取代球面镜,则可以克服离心误差。如图 2 所示,固定抛物面镜使得其焦点位置与入射光经透镜 Lens2 后在光栅面的汇聚点重合。当入射光束经光栅衍射分光后由抛物面镜反射成平行光束,对称放置两块平面反射镜,其中反射镜 1 固定不动,反射镜 3 沿光束方向扫描。易知此时在动镜移动过程中光束始终能够原路返回,不再有系统误差。

当光栅栅距较大、一级衍射角较小时,可以直接用图 1 中的消色差透镜 Lens 2 来合光,使衍射光束聚成平行光束,便于进行动镜的扫描。如图 3 所示,入射光经光栅衍射后直接由透镜 Lens 2 合成为平行光束,分别经固定的平面镜 1 和平动的平面镜 2 反射返回,再二次衍射形成测量信号。

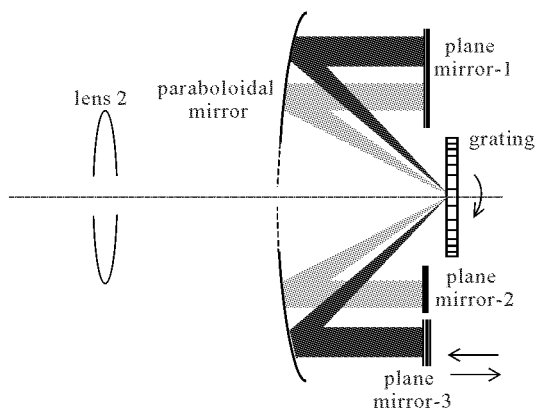


图 2 采取抛物面镜的方案

Fig. 2 Scheme by means of paraboloidal mirror

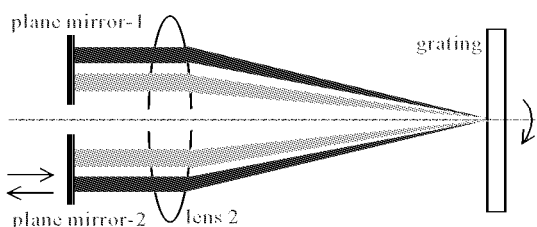


图 3 直接采取透镜 Lens 2 合光的方案

Fig. 3 Scheme of directly adopt Lens 2 to combine the diffraction light

3 实 验

本文采用的光栅为 Sony 公司生产的反射式圆

盘旋转相位光栅,光栅的栅距为 $1\ \mu\text{m}$,半径为 $45\ \text{mm}$ 。旋转工作台 (PH566 - A) 由转台控制器 (SIGMA Mark-10) 发出连续的数字脉冲控制作匀速转动,旋转角速度 $\omega = 2^\circ/\text{s}$,所以由式(3)可求得光栅的调制频率 $f = 1.57\ \text{kHz}$ 。扫描平面镜 2 由 PZT 工作台 (PI E501. 10) 驱动、信号发生器 (VP-7402A) 发出锯齿波信号进行控制,动镜移动的最大距离 $z_{\text{max}} = 200\ \mu\text{m}$,所以由式(4)可求得频谱的测量分辨率 $\Delta\nu = 25\ \text{cm}^{-1}$ 。

为了校验本系统的测量可靠性和调制效果,采用 $\lambda = 532\ \text{nm}$ 的 YAG 激光器作为锁相放大器的参考输入,测量 $\lambda = 633\ \text{nm}$ 的 He-Ne 激光和 $\lambda = 670\ \text{nm}$ 的半导体激光的拍频干涉图,采用如图 1 的装置,测量结果如图 4,5 所示。图 4 为光栅调制前后的干涉图对比,图 5 为干涉图的局部放大。对调制前后的干涉图分别作快速傅里叶变换,可得对应的频谱图如图 6 所示。由图 6 可以看出,经光栅调制后测量灵敏度倍增了 20 倍。

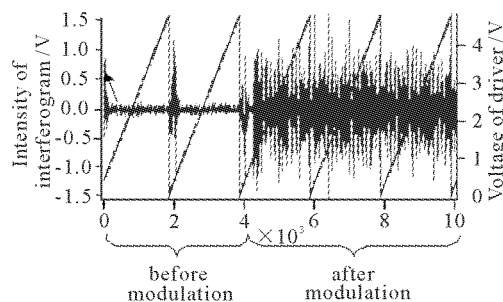


图 4 光栅调制前后的干涉图对比

Fig. 4 Comparison between the interferogram without modulation and that with modulation

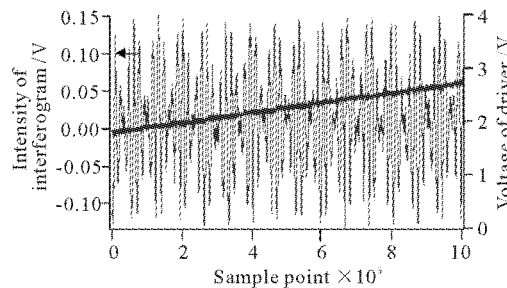


图 5 波长为 633 nm 和 670 nm 的激光拍频干涉部分示意图

Fig. 5 Part interferogram of beat lasers with the wavelength of 633 nm and 670 nm

此外,还采用如图 3 的方案同时记录了波长为 $532\ \text{nm}$, $633\ \text{nm}$ 和 $670\ \text{nm}$ 的 3 条谱线的干涉图和

频谱图,分别如图 7,8 所示。图 8 还同时显示了 24 h 前后测得的两组频谱图,可以看出它们吻合得相当好,说明本系统具有长时间的测量稳定性和可重复性。

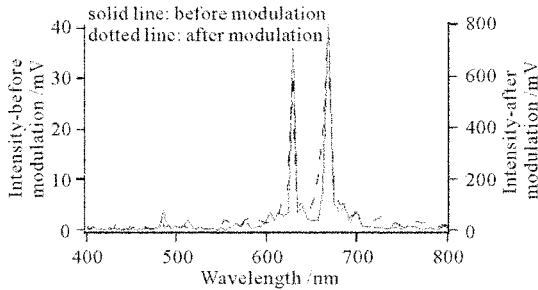


图 6 光栅调制前后的频谱图对比

Fig. 6 Comparison between the spectrum without modulation and that with modulation

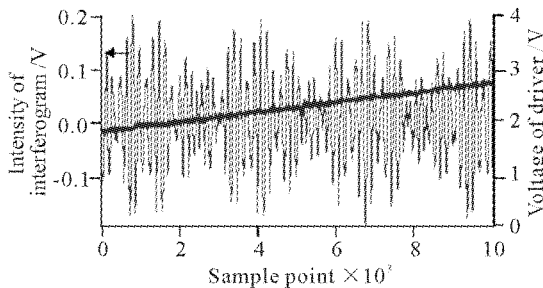


图 7 波长为 532 nm, 633 nm 和 670 nm 的激光拍频干涉图部分示意

Fig. 7 Part interferogram of beat lasers with the wavelength of 532 nm, 633 nm and 670 nm

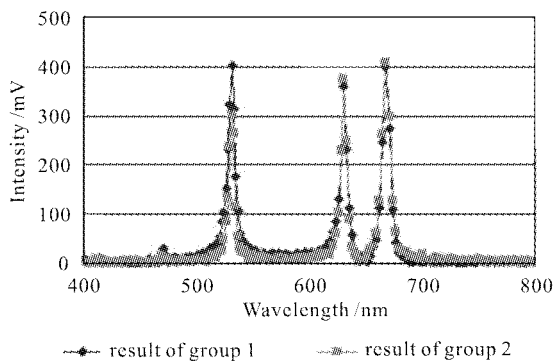


图 8 3 谱线激光频谱图和稳定性实验

Fig. 8 Spectrum with 3 wavelength and the check of stability

4 结 论

本文提出并经实验验证了一种基于旋转光栅实

现外差调制的傅里叶变换光谱仪的可行性,该系统具有良好的稳定性和抗干扰能力,经光栅调制以后测量灵敏度倍增 20 倍,如果将动镜改由直流电机驱动,则可以获得更高的测量分辨率,结合圆盘光栅能够进行连续调制的特点,就可以同时实现高分辨率和高测量灵敏度的优点。本装置尤其适用于近红外领域和进行微弱信号的频谱测量。

致谢 本实验在日本国家计量研究所完成;非常感谢日本产总研光技术研究所西井准治、金高健二,长野县精密工业试验场田恒千英的技术支持和帮助。

参 考 文 献

- Jonas Sandsten, Hans Edner, Sune Svanberg. Gas imaging by infrared gas-correlation spectrometry [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(23):1945~1947
- Michiaki Endo, Haruo Yashida, Yasuhiro Maeda. Infrared monitoring system for the detection of organic contamination on a 300 mm Si wafer [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, **75**(4):519~521
- Y. Nagasawa, A. Ishitani. Application of Fourier transform infrared emission spectrometry to surface analysis [J]. *Appl. Spectroscopy*, 1984, **38**(2):166~173
- Lawrence Mertz. *Fourier Transform Spectrometry* [M]. John Wiley & Sons Inc., 1965. 1~14
- J. Courtial, B. A. Petterson, W. Hirst *et al.*. Static Fourier-transform ultraviolet spectrometer for gas detection [J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(13):2813~2817
- Fujin Long, Teresa B. Fraedman, Thomas J. Tague *et al.*. Step-scan Fourier transform vibrational circular dichroism measurements in the vibrational region above 2000 cm^{-1} [J]. *Appl. Spectroscopy*, 1997, **54**(4):508~511
- Brian R. Stallard, Robert K. Rowe, Arnold J. Howard *et al.*. Near in-frared spectroscopy with a dispersive waveguide [J]. *Appl. Spectroscopy*, 1997, **51**(6):880~882
- Hirokazu Matsumoto, Akiko Hirai. A white-light interferometer using a lamp source and heterodyne detection with acousto-optic modulators [J]. *Opt. Comm.*, 1999, **170**:217~220
- Akiko Hirai, Lijiang Zeng, Hirokazu Matsumoto. Heterodyne Fourier transform spectroscopy using moving diffraction grating [J]. *Jap. J. Appl. Phys.*, 2001, **40**(10):6138~6142
- W. H. Stevenson. Optical frequency shifting by means of a rotating diffraction grating [J]. *Appl. Opt.*, 1970, **9**(3):649~652