

## 全光纤傅里叶变换光谱仪的关键技术研究

王安, 朱灵\*, 张龙, 刘勇, 朱震, 李志刚, 巫建东, 范彦平

安徽省光子器件与材料重点实验室, 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽合肥 230031

**摘要** 研究一种基于光纤 Mach-Zehnder 干涉仪结构的全光纤傅里叶变换光谱仪 (fiber fourier transform spectrometer, FFTS)。设计了光程调制范围可达 2 cm 的压电陶瓷光纤相位调制器, 代替传统傅里叶变换光谱仪中的动镜产生光程扫描。实验中采用 1 310 nm DFB 激光器作为参考光源, 对测试光干涉图进行等光程间隔采样, 以消除压电陶瓷非线性光程调制产生的误差。通过对测试光干涉图做傅里叶逆变换得到测试光谱图。利用该 FFTS 系统测量了 ASE 宽带光源的光谱, 并将测量结果和光栅光谱仪测量结果进行了对比, 结果表明两者所测 ASE 光谱线型一致。最后, 利用光纤光栅作为样品, 对 FFTS 系统的光谱分辨率进行了检测, 光谱分辨率达到了  $0.78 \text{ cm}^{-1}$ 。

**关键词** 傅里叶变换光谱仪; 光纤干涉仪; 光谱分析

**中图分类号:** O433.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2009)07-1777-04

### 引言

傅里叶变换光谱法分析物质原子和分子吸收、发射光谱的有效手段。其原理是利用干涉图与光源光谱图之间的对应关系, 通过测量干涉图并对干涉图进行傅里叶变换, 得到光谱图, 进而获取光谱信息<sup>[1]</sup>。与传统傅里叶变换光谱仪 (FTS) 相比, 全光纤傅里叶变换光谱仪 (FFTS) 具有无运动部件、体积小、抗电磁干扰、耐高温和耐化学腐蚀等优点, 是光谱分析的有力工具。法国巴黎天文台的 Zhao 等陆续报道了用于天文观测的、采用双光纤干涉仪结构的全光纤器件傅里叶变换光谱检测装置<sup>[2-4]</sup>; Stelzele 等<sup>[5]</sup>利用温度效应实现相位调制, 建立了光纤傅里叶变换光谱仪, 光谱分辨率为  $4 \text{ cm}^{-1}$ , 但是由于采用传统光学分束器易受环境震动影响, 且温度调制光程在参考光信号中出现不规则脉冲, 容易造成相位误差和强度误差; Froggat 等<sup>[6]</sup>建立了一种基于光纤光栅的全光纤傅里叶变换光谱检测装置, 光谱分辨率相当于  $0.82 \text{ cm}^{-1}$ , 但是由于受光纤光栅周期的限制, 光谱分辨率和测量范围受到很大的限制, 只适合测量相干长度比较长的谱线; 此外, 全光纤傅里叶变换光谱仪还可用于光纤光栅的解调, Davis 等采用全光纤傅里叶变换光谱法, 实现了光纤 Bragg 光栅传感器的波长解码<sup>[7]</sup>; 本课题组曾建立了基于 Mach-Zehnder 干涉仪的全光纤傅里叶变换光谱仪<sup>[8,9]</sup>, 采用

光纤和光纤耦合器分别代替传统光路和分束镜, 利用压电陶瓷的压电效应来改变光纤的长度代替动镜移动实现光程差的扫描, 初步实验光谱分辨率达到了  $7 \text{ cm}^{-1}$ 。

傅里叶变换光谱仪的分辨率由干涉仪两臂的光程差决定<sup>[10]</sup>, 要提高分辨率必须提高两臂的光程差。本文设计了基于压电陶瓷的光纤相位调制器, 加大了两臂光程差的调制范围, 提高了光谱分辨率, 实现了对 ASE 宽带光源的光谱测量。

### 1 FFTS 原理

如图 1 所示, 设单色光  $E_0(\omega_0)$  从端口 1 进入干涉仪即  $E_1 = E_0(\omega_0)$  且  $E_2 = 0$ , 在忽略损耗的条件下, Mach-Zehnder 干涉仪的传输矩阵为

$$\begin{bmatrix} E_3 \\ E_4 \end{bmatrix} = T_2 B T_1 \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中,  $T_1$  和  $T_2$  分别为两光纤耦合器  $C_1$  和  $C_2$  的传输矩阵;  $B$  为中间两臂光纤的传输矩阵。在只考虑某个偏振方向的耦合, 忽略各自的双折射和偏振态演化的前提下, 则有

$$T_1 = \begin{bmatrix} \sqrt{\rho_1} & i\sqrt{1-\rho_1} \\ i\sqrt{1-\rho_1} & \sqrt{\rho_1} \end{bmatrix} \quad (2)$$

收稿日期: 2008-05-06, 修订日期: 2008-08-12

基金项目: 中国科学院科技创新基金项目 (CXJJ-161) 资助

作者简介: 王安, 1958 年生, 中国科学院安徽光学精密机械研究所研究员 e-mail: wangan@aiofm.ac.cn

\* 通讯联系人 e-mail: zhul@aiofm.ac.cn

$$T_2 = \begin{bmatrix} \sqrt{\rho_2} & i\sqrt{1-\rho_2} \\ i\sqrt{1-\rho_2} & \sqrt{\rho_2} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$B = \begin{bmatrix} \exp(j\beta_1 L_1) & 0 \\ 0 & \exp(j\beta_2 L_2) \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中,  $\rho_1$  和  $\rho_2$  分别为两光纤耦合器的分束比;  $\beta_1$  和  $\beta_2$  分别为两干涉臂的传输常数;  $L_1$  和  $L_2$  分别为两干涉臂的长度。



Fig. 1 Mach-Zehnder interferometer

光纤 Mach-Zehnder 干涉仪的输出光强为

$$I_3 = B_0(\bar{\nu}_0) [\rho_1 \rho_2 + (1-\rho_1)(1-\rho_2) - 2\sqrt{(1-\rho_1)(1-\rho_2)} \rho_1 \rho_2 \cos(2\pi\bar{\nu}_0 \delta)] \quad (5)$$

$$I_4 = B_0(\bar{\nu}_0) [(1-\rho_1)\rho_2 + (1-\rho_2)\rho_1 + 2\sqrt{(1-\rho_1)(1-\rho_2)} \rho_1 \rho_2 \cos(2\pi\bar{\nu}_0 \delta)] \quad (6)$$

从上式可以看出, 入射光为单色光源时, 光纤干涉仪的输出是光程差  $\delta$  的函数, 且光谱被调制成余弦函数。然而在实际中光源都有一定线宽, 如果线宽为  $d\bar{\nu}$ , 波数为  $\bar{\nu}$ , 辐射强度为  $B_0(\bar{\nu})$ , 仅交流部分对光谱测量有意义, 则可以写成

$$I(\delta) = 2 \int_0^{\infty} [B_0(\bar{\nu}) \sqrt{(1-\rho_1)(1-\rho_2)} \rho_1 \rho_2 \exp(i2\pi\bar{\nu}\delta)] d\bar{\nu} \quad (7)$$

并设  $H(\bar{\nu}) = \sqrt{(1-\rho_1)(1-\rho_2)} \rho_1 \rho_2$ , 且将波数扩展到负频率空间, 则可以写成

$$I(\delta) = \int_{-\infty}^{\infty} [B_0(\bar{\nu}) H(\bar{\nu}) \exp(i2\pi\bar{\nu}\delta)] d\bar{\nu} \quad (8)$$

在采用宽带耦合器的情况下, 可以近似认为  $\rho_1$  和  $\rho_2$  是常数, 即  $H(\bar{\nu})$  与波数无关, 即可以忽略。因此, 得

$$I(\delta) = 2 \int_0^{\infty} [B_0(\bar{\nu}) \exp(i2\pi\bar{\nu}\delta)] d\bar{\nu} \quad (9)$$

干涉图的傅里叶逆变换就是光谱

$$B_0(\bar{\nu}) = 2 \int_0^{\infty} [I(\delta) \exp(i2\pi\bar{\nu}\delta)] d\delta \quad (10)$$

上式中  $I(\delta)$  与  $B_0(\bar{\nu})$  互为傅里叶变换, 干涉图的傅里叶逆变换就是光谱。是光纤傅里叶变换光谱仪的基本方程, 实际计算中光谱计算通过快速傅里叶变换(FFT)算法完成。

## 2 FFTS 系统关键技术

图 2 是基于 Mach-Zehnder 干涉仪的 FFTS 系统结构图, 参考光和测试光分别从干涉仪的两端输入, 通过干涉仪后由光探测器接收, 经采集卡采集输入计算机进行数据处理。

### 2.1 FFTS 系统结构

参考光源 LD 发出的光从耦合器  $XC_1$  的一端输入, 通过耦合器后被分为两束, 一束光经压电陶瓷光纤相位调制器和光纤准直器进入耦合器  $XC_2$ , 另一束光经压电陶瓷光纤相位调制器和光衰减器进入耦合器  $XC_2$ , 两束光相遇发生干涉后

经耦合器  $XC_2$  的一臂输出进入铟镓砷光探测器  $D_1$ ; ASE 测试光源发出的光从耦合器  $XC_2$  的一端输入, 通过耦合器后被分为两束, 一束光经压电陶瓷光纤相位调制器和光纤准直器进入耦合器  $XC_1$ , 另一束光经压电陶瓷光纤相位调制器和光衰减器进入耦合器  $XC_1$ , 两束光相遇发生干涉后经耦合器  $XC_1$  的一臂输出进入铟镓砷光探测器  $D_2$ ; 耦合器在 1 310 nm 的分束比为 49/51, 带宽为  $\pm 40$  nm; 探测器输出的信号经放大后由数据采集卡采集进行 A-D 转换后输入计算机进行数据处理。

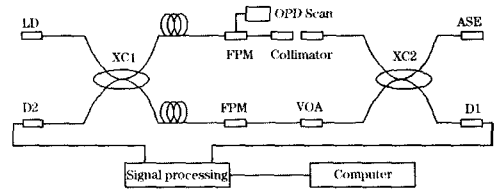


Fig. 2 FFTS based on Mach-Zehnder Interferometer

$XC_1, XC_2$ : Fiber optic coupler; FPM: Fiber phase modulator; VOA: Variable optical attenuator;  $D_1, D_2$ : Photodetector

### 2.2 压电陶瓷光纤相位调制器设计

压电陶瓷光纤相位调制器是 FFTS 的核心器件, 它利用机械应力对光纤长度进行调制, 如图 3 所示, 将压电陶瓷夹在两个半圆柱中间, 再在半圆柱上绕制光纤, 形成一种拉伸结构, 在三角波驱动电压作用下, 压电陶瓷沿径向伸缩, 从而带动光纤的拉伸或收缩, 实现光程差的调制。这样光纤仅存在轴向拉伸, 减少了由光纤的剪切力和弯曲引起的双折射效应。绕接在圆柱上的圈数实际上可以认为是光程的放大倍数, 绕接圈数越多, 光程扫描范围越大, 绕接圈数受压电陶瓷的最大推力和光纤的杨氏模量的限制。

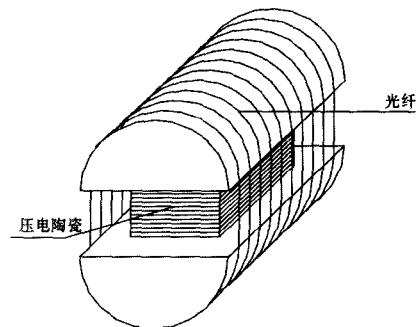


Fig. 3 Fiber phase modulator

光纤傅里叶变换光谱仪的光谱分辨率是由最大光程差决定的, 要达到  $1 \text{ cm}^{-1}$  的光谱分辨率, 产生的光程差应大于 1 cm。根据光纤应变效应, 由光纤弹光理论<sup>[11]</sup>可以计算出光程差与光纤拉伸长度的关系为

$$\Delta L_{\text{opt}} = \Delta L \{n - 0.5n^3 [(1-\mu)p_{12} - \mu p_{11}]\} \quad (11)$$

其中  $\Delta L$  是光纤拉伸长度,  $n$  是光纤折射率,  $\mu$  是泊松比,  $p_{ij}$  是弹光张量。

则压电陶瓷的最小伸缩位移为

$$\Delta x = \Delta L / 2m \quad (12)$$

其中  $m$  为压电陶瓷上绕的光纤圈数。

综合考虑以上参数,我们选择了中电集团 26 所生产的压电陶瓷,压电陶瓷光程调制器的圆柱半径为 30 mm,高 60 mm,共绕 215 圈。这样,调制器上绕的光纤总长度约为 80 m。为了抵消因绕接弯曲而产生的双折射效应影响输出的干涉条纹对比度,我们在两条臂各加一个压电陶瓷光纤相位调制器。

### 2.3 干涉仪的等臂长调节技术

实验中使用的参考光源是 DFB 半导体激光器,它用来产生干涉图对测试光进行等光程间隔采样,消除由温度及压力对光纤干涉仪影响和压电陶瓷光程扫描引起的非线性误差。测试光源是 ASE 宽带光源,输出光谱范围是 1 520~1 570 nm,光源相干长度只有几十微米,而干涉仪的每条臂长度达到一百米,所以首先必须将干涉仪两臂调整到平衡状态。

我们采用半导体激光器电流调制技术<sup>[12]</sup>来实现干涉仪两臂的平衡。调节过程分为两步:

首先,当两臂光程差较大时,用电流调制技术将光程差降低到毫米量级。当半导体激光器注入电流发生调制时,在调制周期内干涉仪的输出可以写为

$$I(D, t) = I_0 [1 + V \cos(2\pi\nu_b t + \varphi_{b0})] \quad (13)$$

其中  $\nu_b = 2\pi\Delta\omega_m D/c$  为干涉仪输出信号的频率,  $\varphi_{b0} = 2\pi D/\lambda_0$  为初始相位,  $\Delta\nu$  是激光频率调制范围,  $\nu_m$  为电流调制频率,  $\lambda_0$  为中心波长。根据上式可以得到

$$D = \frac{c\nu_b}{\Delta\omega_m} \quad (14)$$

$\nu_b$  可以用干涉仪的输出信号确定,  $\Delta\nu$  为半导体激光器的频率调制范围,对于确定的激光器是已知的,  $\nu_m$  则是注入电流的调制频率,因此光程差跟  $\nu_b$  成正比关系。根据这个关系可以使干涉仪的臂长差减小到毫米量级;然后,再通过图 2 中由光纤准直器构成的空气光程调节器来对两臂光程差进行微调,并结合干涉图对比度技术将光程差降低到微米量级。

## 3 实验结果

实验中,我们对信号臂的光纤相位调制器施加三角波调制信号,产生光程差扫描,最高调制电压 100 V。在三角波的一个调制周期内,对参考光干涉条纹的过零点进行计数,一个周期内记录的干涉条纹数乘以参考光的波长即为产生的最大光程差。通过计算,在调制电压为 100 V 时,该光程调制器可以产生的最大光程差达到 1.97 cm。

### 3.1 ASE 光源光谱的测量

参考光的干涉图如图 4(a)所示,利用参考光干涉图对测试光进行等光程间隔采样,得到 ASE 光源的干涉图,如图 4(b)所示。

对测试光干涉图作傅里叶变换可以得到 ASE 光源的光谱图,如图 5(a)所示。图 5(b)是 FFTS 和光栅光谱仪测量 ASE 光源光谱的比较图,其中 A 是 FFTS 的测量的光谱图, B 是用 Advantest Q8384 光栅光谱仪测量的光谱图,两条谱

线基本吻合。

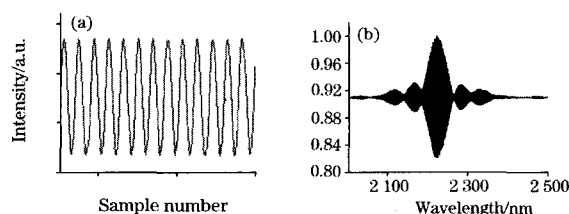


Fig. 4 Interferogram

(a): Reference light interferogram;  
(b): Test light interferogram

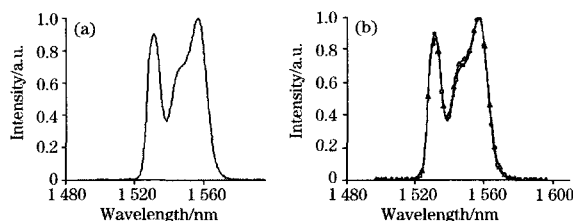


Fig. 5 ASE spectrum

(a): Spectrum by FFTS;  
(b): Spectrum by using FFTS and Grating spectrometer

### 3.2 光纤光栅半高宽的测量

采用一根光纤光栅作为样品,利用 FFTS 系统对其半高宽进行测量,所测光纤光栅的透射谱如图 6(a)所示,可以明显分辨出光纤光栅的反射峰。根据傅里叶变换光谱仪光谱分辨率的检定规程,所测光纤光栅的半高宽即为 FFTS 的光谱分辨率,图 6(b)是光纤光栅的反射谱,图中所示光纤光栅的半高宽为  $0.78 \text{ cm}^{-1}$ ,因此 FFTS 系统的光谱分辨率为  $0.78 \text{ cm}^{-1}$ 。

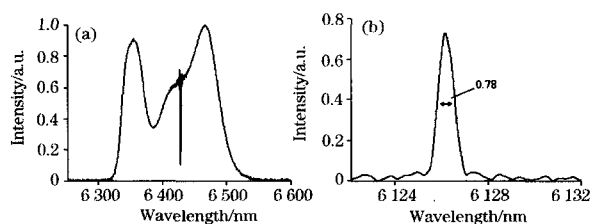


Fig. 6 Transmission spectrum and reflection spectrum of fiber grating

(a): Transmission spectrum of fiber grating;  
(b): Reflection spectrum of fiber grating

## 4 结论

本文建立了一台近红外全光纤傅里叶变换光谱仪,光谱分辨率达到  $0.78 \text{ cm}^{-1}$ ,可应用于光源发射光谱和气体吸收光谱的测量。光纤傅里叶变换光谱仪光谱分辨率高,适合在高温、潮湿和电磁干扰严重的危险环境下使用。可以通过提高光纤相位调制器的光程调制范围进一步提高 FFTS 系统的光谱分辨率;光纤的色散特性和光纤耦合器的分束比引起的光谱测量误差,可以通过波数校正来解决;光纤中传输

光的偏振态变化引起的输出信号的偏振衰落现象,可以通过在光路中增加偏振控制器对传输光偏振态进行控制来解决。

目前,我们正在进行相关研究,以增强 FFTS 的稳定性。下一步,将进行 FFTS 系统的应用研究。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] Bell R J. Introductory Fourier Transform Spectroscopy. Academic Press, 1972. 43.
- [ 2 ] Zhao P, Mariotti J M, Lena P, et al. Optics Communications, 1994, 110: 497.
- [ 3 ] Zhao Peiqian, Mariotti J M, Lena P, et al. Applied Optics, 1995, 34(21): 4200.
- [ 4 ] Zhao P, Mariotti J M, Coude du Foresto V, et al. Applied Optics, 1996, 35(16): 2897.
- [ 5 ] Martin Stelzle, Jurgen Tuchtenhagen, John F Rabolt. Meas. Sci. Technol., 1996, 9: 1619.
- [ 6 ] Groggat M, Turan Erdogan. Optics Letters, 1999, 24(14): 942.
- [ 7 ] Davis M A, Kersey A D. J. Lightwave Technology, 1995, 13(7): 1289.
- [ 8 ] LIU Yong, LI Bao-sheng, LIU Yan, et al(刘 勇, 李保生, 刘 艳, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2006, 26(10): 1951.
- [ 9 ] LI Bao-sheng, LIU Yong, WANG An(李保生, 刘 勇, 王 安). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2007, 27(6): 1077.
- [ 10 ] WU Jin-guang(吴瑾光). The Technology and Application of Modern Fourier Transform Spectroscopy(近代傅里叶变换光谱技术及其应用). Beijing: Scientific and Technical Literature Press(北京: 科学技术文献出版社), 1994. 7.
- [ 11 ] Hocker G B. Appl. Opt., 1979, 18(9): 1445.
- [ 12 ] Burnett J G, Jones D C. Applied Opt., 1992, 31(6): 2977.

## Research on Key Technologies of All Fiber Optic Fourier Transform Spectrometer

WANG An, ZHU Ling\*, ZHANG Long, LIU Yong, ZHU Zhen, LI Zhi-gang, WU Jian-dong, FAN Yan-ping  
Anhui Provincial Key Laboratory of Photonic Devices and Materials, Lab of Fiber and Optoelectronics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China

**Abstract** A novel all fiber optic Fourier transform spectrometer based on single mode fiber Mach-Zehnder interferometer is reported. The authors designed a piezoelectric optical phase modulator with two centimeter scan scale, which was used to replace the moving mirror of traditional Fourier transform spectrometer. The 1 310 nm DFB laser was used as reference light source to make equal interval sampling of test light source's interferogram, and to eliminate errors of nonlinear modulation. Through making the inverse Fourier transform to test light source's interferogram, the authors obtained the spectrum of test source. The spectrum of ASE broadband light source was measured by FFTS system, and the experiment result agrees with that tested by grating spectrometer. Finally, the authors utilized fiber grating as sample to measure the resolution of FFTS system, and the spectral resolution is  $0.78 \text{ cm}^{-1}$ .

**Keywords** Fourier transform spectrometer; Fiber optic interferometer; Spectral analysis

(Received May 6, 2008; accepted Aug. 12, 2008)

\* Corresponding author