

文章编号 1004-924X(2010)12-2537-06

光纤傅里叶变换光谱术在 光纤光栅传感解调中的应用

朱 灵,陈明星,方 杰,刘 勇,王 安

(中国科学院 安徽光学精密机械研究所 光电子技术研究室,安徽 合肥 230031)

摘要:介绍了光纤 Mach-Zehnder 干涉仪的基本原理和光纤傅里叶变换光谱仪(FFTS)的结构;基于光纤 Mach-Zehnder 干涉仪,采用傅里叶变换光谱算法对光纤 Bragg 光栅传感器的波长进行了解调。宽带光源发出的光经过光纤耦合器进入光纤 Bragg 光栅,其反射光由耦合器返回进入到 FFTS 中进行测量,FFTS 的最高光谱分辨率达到 0.05 cm^{-1} ,即在近红外 $1\ 550\text{ nm}$ 波长处分辨率为 0.012 nm 。分别对光纤 Bragg 光栅的应变特性和温度特性进行了测量。测量显示:光纤 Bragg 光栅的应变灵敏度为 $0.833\text{ pm}/\mu\epsilon$,温度灵敏度为 $19.78\text{ pm}/\text{C}$ 。得到的结果表明 FFTS 系统具有高分辨率、大测量范围的特点,可满足光纤 Bragg 光栅传感器波长解调的需求。

关 键 词:光纤光栅;傅里叶变换光谱;光纤干涉;波长解调

中图分类号:TN253;O433.5 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20101812.2537

Application of fiber Fourier transform spectroscopy to fiber Bragg grating demodulation

ZHU Ling, CHEN Ming-xing, FANG Jie, LIU Yong, WANG An

(*Opto-electronics Technology Research Laboratory, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China*)

Abstract: The elementary principle of a fiber Mach-Zehnder interferometer and the structure of a Fiber Fourier Transform Spectroscopy(FFTS) were introduced. Then, a novel demodulation scheme for the fiber Bragg grating sensor based on the fiber Mach-Zehnder interferometer and the FFTS was designed to achieve highly stable and accurate wavelength demodulation. In demodulation, the light emitted from a broadband light source was through the fiber coupler into a fiber Bragg grating, and the reflected light of fiber Bragg grating came back from the fiber coupler into the FFTS. The optical path difference of FFTS is up to 10 cm and the maximum spectral resolution is 0.05 cm^{-1} when the unilateral Fourier transform algorithm is used, which means the wavelength resolution is 0.012 nm in near infrared scope of $1\ 550\text{ nm}$. The strain characteristics and temperature characteristics of a fiber Bragg grating were measured by the FFTS, respectively. Experimental results indicate that the strain sensitivity is $0.833\text{ pm}/\mu\epsilon$ and the temperature sensitivity is $19.78\text{ pm}/\text{C}$. Obtained data show that the

收稿日期:2010-01-07;修订日期:2010-03-03.

基金项目:中国科学院创新基金资助项目(No. CXJJ-161);中科院知识创新工程人才专项基金资助项目(No. O83RC11124)

FFTS system has advantages of high spectral resolution and wide measuring ranges and it can satisfy the wavelength demodulation requirements of fiber Bragg grating sensors.

Key words: fiber Bragg grating; Fourier transform spectroscopy; fiber interference; wavelength demodulation

1 引言

光纤傅里叶变换光谱仪是在传统傅里叶变换光谱仪的基础上,采用光纤代替传统光路,光纤耦合器代替分束镜,光纤光程调制器代替移动镜扫描,不仅具有傅里叶变换光谱仪高通量、多通道、高分辨率和高波数精度的特点,而且具有光纤的众多优点。光纤 Bragg 光栅(FBG)作为一种新型传感器,能够直接通过解调光纤光栅的波长信号来进行外界参量传感,已在众多领域得到广泛应用。而且,随着光栅技术的成熟,其研究重点已转向解调系统^[1-3]。全光纤傅里叶变换光谱仪(Fiber Fourier Transform Spectrometer, FFTS)具有无运动部件、体积小、抗电磁干扰、高分辨率等优点,是光谱分析的有力工具,目前,在 Bragg 光栅解调的研究中已得到应用。

1995年,法国巴黎天文台的 P 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^[4-6];1996年, Martin Stelzele^[7]等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 cm^{-1} ,但是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;1999年, Mark Groggat^[8]等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 cm^{-1} ,但是由于受光纤光栅周期的限制,只适合测量相干长度比较长的谱线。在国内,本课题组利用压电陶瓷光纤拉伸器来改变光纤的长度实现光程差的扫描,搭建了基于 Mach-Zehnder 干涉仪的全光纤傅里叶变换光谱仪^[9-11],光谱分辨率达到了 0.78 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^[12],要提高分辨率必须提高两臂的光程差。为了开展全光纤傅里叶变换光谱技术在光纤 Bragg 光栅解调中的应用研究,本文设计了空气光程调制器,最大光程差可达到 10 cm,极大地提高了光谱分辨率,实现了对光纤 Bragg 光栅波

长的解调。

2 FFTS 基本原理和系统结构

2.1 FFTS 基本原理

如图 1 所示,设单色光 $E_0(\bar{\nu}_0)$ 从端口 1 进入干涉仪,即 $E_1 = E_0(\bar{\nu}_0)$ 且 $E_2 = 0$,在忽略损耗的条件下,光纤 Mach-Zehnder 干涉仪的输出光强为^[8]:

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

式中, ρ_1, ρ_2 分别为两光纤耦合器的分束比。

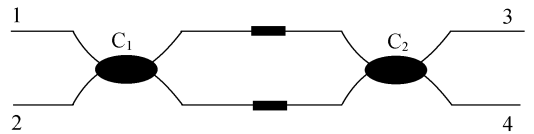


图 1 Mach-Zehnder 干涉仪

Fig. 1 Mach-Zehnder interferometer

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 δ 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:

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

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:

$$I(\delta) = \int_{-\infty}^{\infty} [B(\bar{\nu}) H(\bar{\nu}) \exp(i2\pi\bar{\nu}\delta)] d\bar{\nu}, \quad (3)$$

在采用宽带耦合器的情况下,可以近似认为 ρ_1 和 ρ_2 是常数,即 $H(\bar{\nu})$ 与波数无关,则可以忽略。因此,得

$$I(\delta) = 2 \int_0^{\infty} [B_0(\bar{\nu}) \exp(i2\pi\bar{\nu}\delta)] d\bar{\nu}, \quad (4)$$

$$B_0(\bar{v}) = 2 \int_0^{\infty} [I(\delta) \exp(i2\pi\bar{v}\delta)] d\delta, \quad (5)$$

上式中 $I(\delta)$ 与 $B_0(\bar{v})$ 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。

2.2 FFTS 的系统结构

图 2 是基于光纤 Mach-Zehnder 干涉仪的 FFTS 系统结构图,采用的是 G652 单模光纤。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,经采集卡输入计算机进行数据处理。

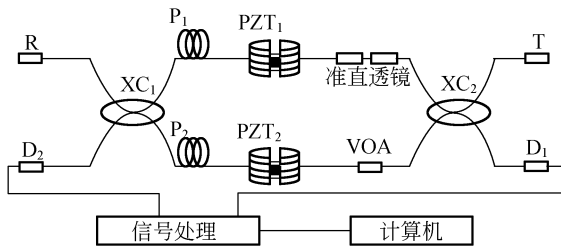


图 2 基于马赫曾德干涉仪的光纤傅里叶变换光谱仪
Fig. 2 FFTS based on Mach-Zehnder interferometer

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 VOA 进入耦合器 XC_2 ,两束光相遇发生干涉后经耦合器 XC_2 的一臂输出进入钢镓砷光探测器 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 的一臂输出进入钢镓砷光探测器 D_2 ;耦合器在 1 310 nm 的分束比为 49/51,带宽为 ± 40 nm;探测器输出的信号经放大后输入计算机进行数据处理。

2.3 空气光程调制器的设计

空气光程调制器由精密电控平移台、光纤精密耦合器和一对光纤准直器组成,如图 3 所示。采用的是北京光学仪器厂的 MTS300 系列精密电控平移台和光纤精密耦合器,深圳汇博光学公司生产的 1 310/1 550 nm 双窗口光纤准直器。

精密电控平移台由步进电机驱动,控制左侧的滑块在导轨上做往复运动。光纤准直器安装在光纤耦合器上,光纤精密耦合器固定在电控平移台上,当给步进电机施加三角波驱动信号时,平移台做来回往复运动,实现干涉仪光程的调制。

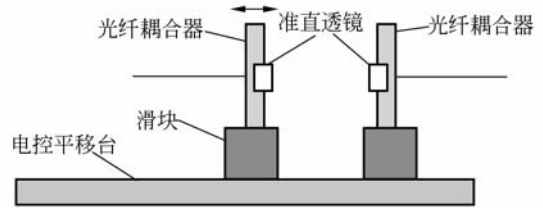


图 3 空气光程调制器
Fig. 3 Air optical path modulator

空气光程调制的优点是可以使干涉仪两臂达到更大的光程差,从而提高傅里叶变换光谱的分辨率。在矩形切趾的情况下,光谱分辨率与光程差的关系可用下式表示^[12]:

$$\Delta\nu = \frac{1}{2L}. \quad (6)$$

实验中空气光程的最大光程调制距离可达 10 cm,因此,FFTS 的最高光谱分辨率可达到 0.05 cm^{-1} 。

3 FBG 温度和应变得解调实验

光纤傅里叶变换光谱仪采用全光纤结构,通过光纤耦合器可以直接与 FBG 相连接进行波长解调。在进行 FBG 解调实验时,FFTS 的光程调制器的最高光程差达到 10 cm,此时最高分辨率是 0.05 cm^{-1} ,在 1 550 nm 的波长分辨率达到 0.012 nm。基于 FFTS 的 FBG 解调系统如图 4 所示,宽带 ASE 光源发出的光经 2×2 耦合器的一

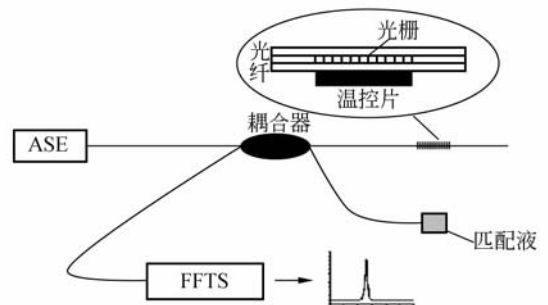


图 4 FBG 解调系统结构图
Fig. 4 Demodulation system of FBG

端输入,进入与耦合器一臂相连的 FBG,FBG 的反射光通过耦合器进入 FFTS 系统,最终由 FFTS 系统解调出反射光的波长。

3.1 FBG 的应变解调实验

在进行应变解调实验时,将 FBG 放置在温控盒中,消除温度变化的影响。为了给 FBG 施加不同的应变,将其粘在压电陶瓷调制器的两个半圆柱上,通过给压电陶瓷施加调制电压,使 FBG 产生相应的应变。在压电陶瓷驱动器上分别施加 0~100 V 电压,电压-应变关系如表 1 所示。FBG 反射光的波长由 FFTS 解调,同时采用 Advantest Q8384 光栅光谱仪作为参考,进行同步测量。

表 1 电压-应变关系

Tab. 1 Relation of voltage -microstrain

电压/V	应变/ $\mu\epsilon$
20	70.24
40	151.81
60	234.80
80	325.78
100	420.77

FFTS 的解调结果如图 5 所示,图中显示的是 0,60 和 100 V 电压下对应的 FBG 反射光光谱,从图中看出,FFTS 可以清晰地分辨不同应变下 FBG 的反射波长,对应的峰值分别为: 1 549.606,1 549.757 和 1 549.852 nm。

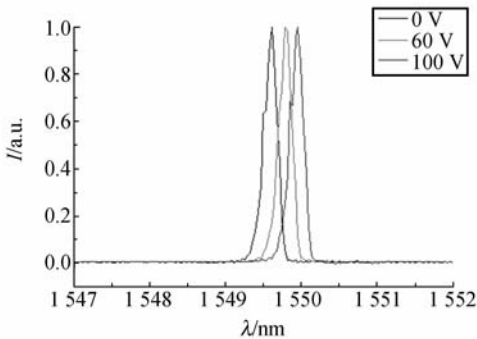


图 5 不同微应变时 FBG 的反射光谱

Fig. 5 Reflectance spectra of FBG in different microstrains

同时采用光栅光谱仪对 FBG 的反射波长进行了测量,图 6 是 FFTS 和光栅光谱仪应变测量结果的对比。从图中可以看出,FFTS 解调系统对应变测量具有较好的线性,尽管波长与光栅光谱仪测量存在偏差,但两者呈现了较好的线性关

系,统计分析显示两者偏差的平均值是 27.8 pm,偏差的标准差是 0.77 pm,可以在处理算法中加以补偿。利用 FFTS 测量数据计算得到的 FBG 波长应变灵敏度系数是 0.833 pm/ $\mu\epsilon$ 。

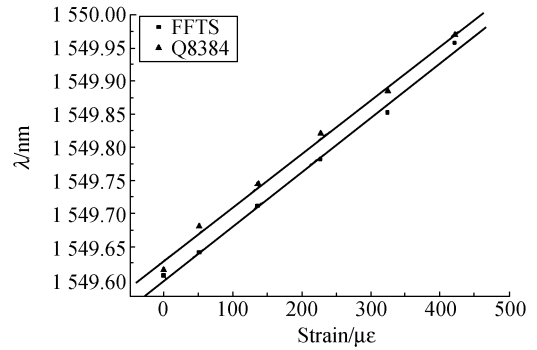


图 6 FFTS 和光栅光谱仪应变解调结果对比

Fig. 6 Comparison of microstrain demodulations of FFTS and grating spectrometer

3.2 FBG 温度解调实验

FBG 温度解调实验采用图 4 中椭圆框内的结构,使用半导体温控片控制 FBG 的温度。在 4.6~29.1 °C,测量了 FBG 的反射光谱,测量结果如图 7 所示。图中是在温度为 4.6,18.1 和 29.1 °C 时 FBG 的反射光谱。FFTS 可以清晰分辨出不同温度时 FBG 的反射峰,峰值分别为 1548.646,1548.911 和 1549.094 nm。

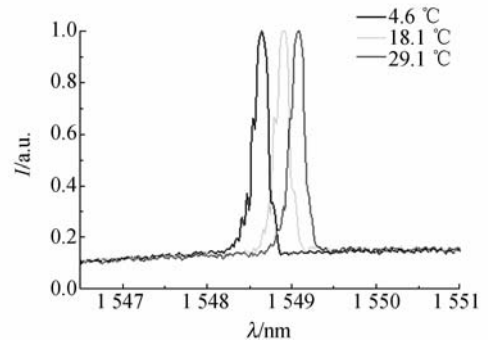


图 7 不同温度时 FBG 的反射光谱

Fig. 7 Reflectance spectra of FBG in different temperatures

图 8 是 FFTS 和光栅光谱仪温度解调结果的对比,从图中可以看出,FFTS 系统解调结果具有较好的线性,尽管解调波长与光栅光谱仪测量存在偏差,但两者呈现了较好的线性关系,统计分析显示两者偏差的平均值是 115.4 pm,偏差的标准差是 12.5 pm,可以在处理算法中加以补偿。利

用 FFTS 测量数据计算得到 FBG 波长温度灵敏度系数为 $19.78 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ 。

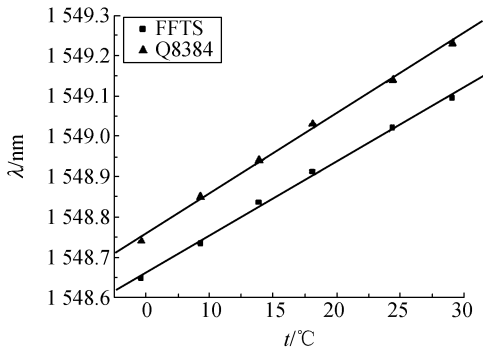


图 8 FFTS 和光栅光谱仪温度解调结果对比

Fig. 8 Comparison of temperature demodulations of FFTS and grating spectrometer

4 结 论

本文介绍了全光纤傅里叶变换光谱仪的原理和系统结构,并使用自行设计的 FFTS 来解调光纤 Bragg 光栅传感器的波长偏移。解调系统的光谱分辨率达到了 0.05 cm^{-1} ,对应在近红外 1550 nm 的波长分辨率为 0.012 nm 。最后,对 FBG 的应变特性和温度特性进行了测量,FBG 的应变灵敏度系数为 $0.833 \text{ pm}/\mu\epsilon$,温度灵敏度系数为 $19.78 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ 。由于 FFTS 体积小,结构紧凑,还可以用来分析各种光源光谱的特性,以及运用在波长编码的光传感技术中,在众多领域有着广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 张锦龙,王奎如,余重秀,等. 光纤环镜在光栅传感解调系统中的应用[J]. 光学精密工程, 2009,17(5):943-949.
ZHANG J L, WANG K R, YU CH X, *et al.*. Application of fiber loop mirror to demodulation system of fiber grating sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009,17(5):943-949. (in Chinese)
- [2] 王为,林玉池,朱萍玉. 光纤光栅在低阻抗材料动态性能测试中的应用[J]. 光学精密工程, 2009,17(3):488-492.
WANG W, LIN Y CH, ZHU P Y. Application of FBG sensor to measurement of dynamic performance of low impedance material [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009,17(3):488-492. (in Chinese)
- [3] 李丽,林玉池,付鲁华,等. 光纤光栅空分光复用传感系统的研究[J]. 光学精密工程, 2007,15(4):473-477.
LI L, LIN Y CH, FU L H, *et al.*. Research on spatial division multiplexing of fiber Bragg grating sensors[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(4):473-477. (in Chinese)
- [4] ZHAO P, MARIOTTI J M, LENA P, *et al.*. Double Fourier interferometry with IR single-mode fiber optic [J]. *Optics Communications*, 1994, (110):497-502.
- [5] ZHAO P Q, MARIOTTI J, LENA P, *et al.*. Performance analyses of an infrared single-mode all-fiber-optic Fourier-transform spectrometer [J]. *Applied Optics*, 1995,34(21):4200-4209.
- [6] ZHAO P, MARIOTTI J M, du FORSESTO V C, *et al.*. Infrared single-mode fiber-optic Fourier-transform spectrometry and double Fourier interferometry [J]. *Applied Optics*, 35 (16): 2897-2901.
- [7] STELZLE M, TUCHTENHAGEN J, RABOLT J F. An all-fibre-optic Fourier transform spectrometer [J]. *Meas. Sci. Technol*, 1996, 9:1619-1630.
- [8] GROGGAT M, ERDOGAN T. All-fiber wavenumber and Fourier-transform spectrometer [J]. *Optics Letters*, 1999,24(14):942-944.
- [9] 刘勇,李保生,刘艳,等. 光纤傅里叶变换光谱分析装置[J]. 光谱学与光谱分析, 2006,26(10):1951-1954.
LIU Y, LI B SH, LIU Y, *et al.*. Optical-fiber Fourier transform spectrometer [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2006,26(10):1951-1954. (in Chinese)
- [10] 王安,朱灵,张龙,等. 全光纤傅里叶变换光谱仪的关键技术研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2009,29(7):1777-1780.
WANG A, ZHU L, ZHANG L, *et al.*. Research

on key technologies of all fiber optic Fourier transform spectrometer[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, 29(7):1777-1780. (in Chinese)

- [11] 朱灵, 刘勇, 张龙, 等. 全光纤傅里叶变换光谱仪消偏振衰落技术研究[J]. 光子学报, 2009, 38(10):2573-2577.

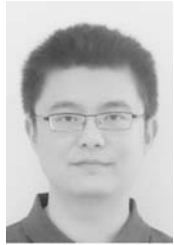
ZHU L, LIU Y, ZHANG L, *et al.*. Elimination of polarization fading in fiber Fourier transform

spectrometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(10):2573-2577. (in Chinese)

- [12] 吴瑾光. 近代傅里叶变换光谱技术及其应用[M]. 北京:科学技术文献出版社, 1994.

WU J G. *The technology and Application of Modern Fourier Transform Spectroscopy* [M]. Beijing: Scientific and Technical Literature Press, 1994. (in Chinese)

作者简介:



朱灵(1982-),男,安徽青阳人,博士研究生,2003年于安徽大学获得学士学位,主要从事光纤傅里叶变换光谱技术的研究。E-mail: zhul@aiofm.ac.cn



陈明星(1983-),男,安徽庐江人,硕士研究生,2007年于淮北煤炭师范学院获得学士学位,主要从事光纤傅里叶变换光谱技术的研究。E-mail: mxchen@mail.ustc.edu.cn



方杰(1986-),男,安徽安庆人,硕士研究生,2008年于安徽大学获得学士学位,主要从事光纤传感技术的研究。E-mail: fangjie803@163.com



刘勇(1969-),男,安徽合肥人,博士,研究员,硕士生导师,1992年于安徽大学获学士学位,2000年、2006年于中国科学院合肥物质科学研究院分别获得硕士、博士学位,主要从事光纤传感技术和智能检测技术的研究。E-mail: liuyong@aiofm.ac.cn

导师简介:



王安(1958-),男,安徽霍山人,博士,研究员,博士生导师,1989年于中国科学院安徽光学精密机械研究所获得博士学位,主要从事光纤传感技术和光纤傅里叶变换光谱技术的研究。E-mail: wangan@aiofm.ac.cn