文章编号: 1001-3806(2004)03-0309-03

温度对光纤光栅反射波长漂移量的影响

贾振安,乔学光,李 明,傅海威,霍汉平,刘颖刚,周 红
(西安石油大学 理学院 光纤传感实验室,西安,710065)

摘要: 设计建立了一套光纤光栅温度传感实验装置,研究了温度对光纤光栅反射波长漂移量的影响。分别对升温和降温过程中光纤光栅反射波长进行了测试,得到了升温和降温过程每度反射波中心波长平均漂移量,分析讨论了波长漂移与温度的变化方向的关系和温度传感响应速度等问题。结果表明,光纤光栅温度传感器响应速度很高,反射波长漂移量与温度具有比较好的线性关系,且与温度的变化方向无关。

关键词: 光纤光栅;光纤传感;温度;波长漂移
中图分类号: TN253 **文献标识码**: A

The influence of temperature on reflected wavelength shift of fiber Bragg gratings

JIA Zhen-an, QIAO Xue-guang, LI Ming, FU Hai-wei, HUO Han-ping, LIU Ying-gang, ZHOU Hong
(Optical Fiber Sensing Laboratory, School of Science, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China)

Abstract: An experimental setup of fiber Bragg gratings temperature sensing has been designed and founded. The influence of temperature on reflected wavelength shift of fiber Bragg gratings was studied. The wavelength shift of fiber Bragg gratings was measured respectively during temperature increasing and dropping. It was obtained that average reflected wavelength shift per Celsius centigrade degree when temperature increasing and dropping. Furthermore, the questions of the relations between wavelength shift and temperature variational direction and temperature sensing response speed was analyzed and discussed thoroughly. The results indicate that the response of fiber grating sensor is rapid. The relations between reflected wavelength shift and temperature have better linearity and the reflected wavelength shift is independent of temperature variational direction.

Key words: fiber Bragg gratings (FBG); optic fiber sensing; temperature; wavelength shift

版权所有 © 《激光技术》编辑部

引 言

光纤光栅(fiber Bragg gratings, FBG)是波长编码传感器,与传统的"光强型"和"干涉型"相比,具有自身独特的优点[1,2]。光纤光栅传感器测量的是 FBG 反射波长的漂移量,与光源强度、光源起伏、光纤弯曲损耗、光纤连接损耗、光波偏振态无关,所以它具有很强的抗干扰能力,并且易于采用波分复用、时分复用和空间复用技术构成光纤光栅智能传感网络,实现分布式多点实时在线传感,广泛用于温度、应力、应变等物理量的测量[3,4]。因此,自 1989 年,MOREY 首次报道将光纤光栅用于传感以来[5],受到了各国的普遍重视[6,7],随着光纤光栅制作工艺的不断成熟[8],光纤光栅传感器的理论和应用研究取得了很大进展[9~17]。

当环境因素变化时,光纤光栅的反射波长将会漂移,通过检测波长漂移量就可以获得被测量。温度是能直接引起 Bragg 反射波长 λ_B 漂移的物理量之一,因此,研究温度对波长漂移量的影响对光纤光栅传感器具有重要的意义,近年来,对此进行了大量研究工作[18,19]。通过实验对温度对光纤光栅反射波长漂移量的影响做了详细的研究,分析了在不同温度区间波长漂移量的规律,并对波长漂移量与温度的变化方向进行了讨论。

基金项目:国家高技术研究发展计划资助项目(2002AA313150);国家自然科学基金资助项目(69877025);国家教育部科学技术重点项目资助项目(02190)

作者简介:贾振安(1959-),男,教授,主要从事光纤传感的理论、实验及应用研究。
E-mail: jiazhen-an@tom.com

收稿日期:2002-12-12;收到修改稿日期:2003-11-18

1 光纤光栅温度传感理论

光纤光栅的 Bragg 方程为:

$$\lambda_c = 2 n_{eff} \Lambda \tag{1}$$

式中,λ_c 为光纤光栅的布拉格反射光波中心波长,n_{eff}为光纤光栅反射光波的有效折射率,Λ 是光栅的周期。当环境温度 T 发生变化时,若不考虑应力作用,由(1)式得 Bragg 方程的变分形式为:

$$\Delta\lambda_c = 2(\Delta n_{eff}\Lambda + n_{eff}\Delta\Lambda) = 2\left\{\left[\frac{\partial n_{eff}}{\partial T}\Delta T + (\Delta n_{eff})_{ep} + \frac{\partial n_{eff}}{\partial a}\Delta a\right]\Lambda + n_{eff}\frac{\partial\Lambda}{\partial T}\Delta T\right\} \tag{2}$$

式中,$(\Delta n_{eff})_{ep}$表示热膨胀引起的弹光效应;$\partial n_{eff}/\partial a$ 表示由于热膨胀导致光纤芯径变化而产生的波导效应。

由(1)式、(2)式,得:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \frac{1}{n_{eff}}\cdot\frac{\partial n_{eff}}{\partial T} + \frac{1}{n_{eff}}\cdot\frac{\partial(\Delta n_{eff})_{ep}}{\partial T} + \frac{\partial n_{eff}}{\partial a}\cdot\frac{\Delta a}{\Delta T} + \frac{1}{\Lambda}\cdot\frac{\partial\Lambda}{\partial T}\Delta T \tag{3}$$

式中,$1/n_{eff}\cdot\partial n_{eff}/\partial T$ 为光纤光栅的热光系数,用 ξ 表示;$1/\Lambda\cdot\partial\Lambda/\partial T$ 为光纤光栅的热膨胀系数,用 α 表示。因此(3)式可以写成:

$$\frac{\Delta\lambda_c}{\lambda_c} = \left[\xi + \alpha + \frac{1}{n_{eff}}\cdot\frac{\partial(\Delta n_{eff})_{ep}}{\partial T} + \frac{\partial n_{eff}}{\partial a}\cdot\frac{\Delta a}{\Delta T}\right]\Delta T = \eta\Delta T \tag{4}$$

式中,

$$\eta = \xi + \alpha + \frac{1}{n_{eff}}\cdot\frac{\partial(\Delta n_{eff})_{ep}}{\partial T} + \frac{\partial n_{eff}}{\partial a}\cdot\frac{\Delta a}{\Delta T} \tag{5}$$

η 是光纤光栅的温度灵敏度系数。因为弹光效应和波导效应对光纤光栅温度灵敏度系数 η 的影响较热光系数 ξ 和热膨胀系数 α 小得多,所以可以忽略它们对 η 的影响,这样,(5)式就变为:

$$\eta = \xi + \alpha \tag{6}$$

即

$$\frac{\Delta\lambda_c}{\lambda_c} = (\xi + \alpha)\Delta T = \eta\Delta T \tag{7}$$

若不考虑温度对热膨胀系数 α 和热光系数 ξ 的影响,则光纤光栅温度灵敏度系数 η 为一常量,由(7)式可以得出,光纤光栅反射波中心波长相对漂移量 $\Delta\lambda_c/\lambda_c$ 与温度改变量 ΔT 成正比,比例系数就是温度灵敏度系数 η。对掺锗石英光纤,$\xi \approx 9.9 \times 10^{-6}/℃$,$\alpha \approx 0.55 \times 10^{-6}/℃$,所以 $\eta \approx 10.45 \times 10^{-6}/℃$[20]。

2 实验方法

实验装置如图 1 所示。从宽带光源发出的中心波长为 1545.1nm(阈值为 7.7dB,带宽为 40.0nm)的红外光通过 3dB 耦合器入射到单模光纤,进而入射到置于加热箱内的光纤光栅,经光纤光栅反射的光通过耦合器进入光谱分析仪(Anritsu MS9710C)。光纤光栅是用准分子激光器的紫外光在掺锗单模光纤上采用相位掩模板技术紫外侧写入的,加热箱的温度由电子加热炉控制,温度大小由箱面板上的数字表读取。

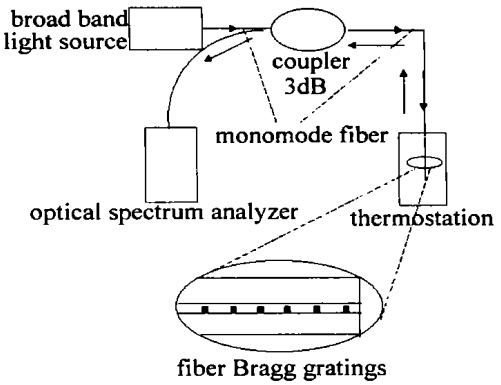

Fig. 1 Schematic diagram for fiber grating temperature sensing

3 实验结果及分析

采用图 1 所示的装置进行了多次实验。实验中,温度变化范围为 20 ℃～260 ℃,图 2 为起始温度(20 ℃)时光纤光栅的反射光谱线,图 3 为终止温度

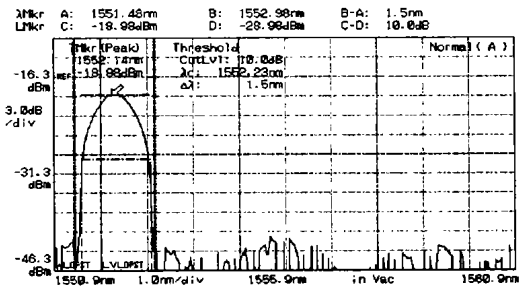

Fig. 2 The reflection spectrum of FBG(at beginning)

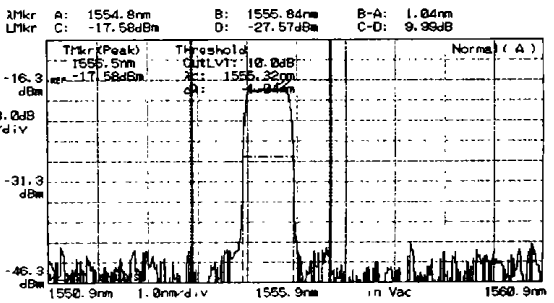

Fig. 3 The reflection spectrum of FBG(at the end)

(260 ℃)时光纤光栅的反射光谱线。域值取10.0dB,温度每变化 10 ℃记录一个 λ_c,在该温度范围内,反射

版权所有 ©《激光

中心波长 λ_c 的总漂移量为 $\Delta\lambda_c = 3.190$nm。

实验得到如下结果:(1) 图 4 中是升温过程和降温过程反射波长与温度的关系曲线,两条曲线的重合性非常好,说明光纤光栅波长漂移与温度的变化方向无关;(2) 升温过程每度反射波的中心波长平均漂移量 $\overline{\Delta\lambda}_{c1} = 0.0133$nm/℃,降温过程每度反射波的中心波长平均漂移量 $\overline{\Delta\lambda}_{c2} = 0.0132$nm/℃,两者差值 $\overline{\Delta\lambda}_{c1} - \overline{\Delta\lambda}_{c2} = 0.0001$nm/℃,相对误差为0.8 %;(3) 测得光纤光栅温度灵敏度系数 η 在 20 ℃～260 ℃的平均值的值为 $\overline{\eta} \approx 8.508 \times 10^{-6}$/℃,与理论值吻合得比较好;(4) 实验中光谱仪每次扫描时间为 2s～4s,反映了光纤光栅温度传感器的响应速度很高;(5) 不论是升温过程还是降温过程,等间隔温度变化所对应的反射波长漂移量基本相同,所以波长漂移与温度线性关系较好。

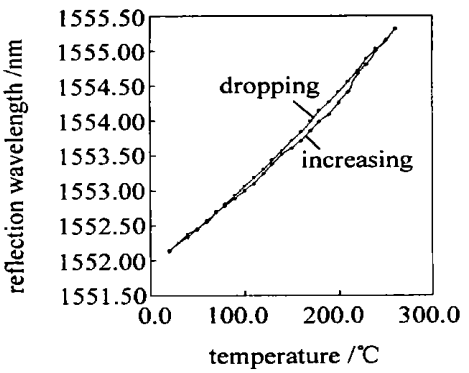

Fig. 4　Reflection wavelength shift versus temperature

4　结　论

分析研究了温度对光纤光栅反射波长漂移量的影响,结果表明:光纤光栅反射波长漂移量与温度的变化方向无关,且具有比较好的线性关系;光纤光栅温度传感器具有很高的响应速度;光纤光栅温度灵敏度系数的实验值与理论值吻合得比较好,表明光纤光栅温度传感的理论模型具有良好的实验基础。

参　考　文　献

[1] 鲍吉龙,章献民,陈抗生 *et al*. 光纤光栅传感器及其应用 [J]. 激光技术,2000,24(3):174～179.

[2] 王启明,魏光辉,高以智. 光子学技术 [M]. 北京:清华大学出版社,广州:暨南大学出版社,2002. 91～107.

[3] GUAN B O,TAM H Y,TAO X M *et al*. Simultaneous strain and temperature measurement using a superstructure fiber Bragg grating [J]. IEEE Photon Technol Lett,2000,12(6):675～677.

[4] AFERREIRA L, SANTOS J L, FARAHI F *et al*. Simultaneous measurement of strain and temperature using interferometrically interrogated fiber Bragg grating sensors [J]. Opt Engng,2000,39(8):2226～2233.

[5] MOREY W W. Fiber optic Bragg grating sensors [J]. Proc SPIE,1989,1169:98～107.

[6] RAO Y J. In-fiber Bragg grating sensors [J]. Meas Sci & Technol,1997,8(4):355～375.

[7] KERSEY A D,DAVIS M A,PATRICK H J *et al*. Fiber grating sensors [J]. J Lightwave Technol,1997,15(8):1442～1463.

[8] 贾宏志,李育林,忽满利. 光纤光栅制作技术 [J]. 激光技术,2001,25(1):23～26.

[9] 谢　芳,张书练,李　岩 *et al*. 光纤光栅反射波长移动研究 [J]. 激光技术,2002,26(2):84～85.

[10] 夏光琼,吴正茂,陈建国. 光纤光栅的长度对其反射率的影响 [J]. 激光技术,2002,26(2):106～107.

[11] 张水胜,刘爱萍,郁　可. 布喇格光纤反射特性及制作的理论研究 [J]. 激光技术,1998,22(6):367～370.

[12] 张书练,李相培,谢　芳 *et al*. 用于测量液面高度的光纤光栅传感器 [J]. 激光技术,2001,25(1):7～10.

[13] RAO Y J. Recent progress in application of in-fiber Bragg grating sensors [J]. Opt & Las,1999,31:297～324.

[14] QIAO X G,LI Y L. Hybrid FBG/LPFG sensor for simultaneous measuring strain and temperature of oil/gas bottomline [J]. J of Optic-electronics Laser,1999,10(1):42～45.

[15] SPRIRIN V V,SHLYAGIN M G,MIRDONOV S B *et al*. Fiber Bragg grating sensor for petroleum hydrocarbon lake detection [J]. Opt Lasers Engng,2000,32:497～503.

[16] 万里冰,武湛君,张博明 *et al*. 应用光纤 Bragg 光栅测量混凝土结构内部应变 [J]. 光电子·激光,2002,13(7):722～725.

[17] 姜德生,何　伟. 光纤光栅传感器的应用概况 [J]. 光电子·激光,2002,13(4):420～430.

[18] DU W Ch,TAM H Y,DEMOKAN M S *et al*. A simple method to enhance temperature sensitivity of fiber grating [J]. Chinese J Lasers,1997,24(1):75～77.

[19] REID M B, ZCAN M. Temperature dependence of fiber optic Bragg gratings at low temperature [J]. Opt Engng,1998,37(1):237～240.

[20] 廖延彪. 光纤光学 [M]. 北京:清华大学出版社,2000. 200～204.

(上接第 305 页)

[2] CLOGE D. Weakly guiding fiber [J]. Appl Opt,1971,10:2252～2258.

[3] CLOGE D. Dispersion in weakly guiding fibers [J]. Appl Opt,1971,10:2442～2445.

[4] POOLE C D,WIESSNFELD J M,DIGIOVANNI D J *et al*. Optical fiber-based dispersion compensation using higher order modes near cutoff [J]. Journal of Lightwave Technology,1994,12(10):1746.

[5] LI M J. Recent progress in fiber dispersion compensators [J]. Opt Commun,2001,4:486～489.

[6] DANZIGER Y, le ZION R, BRAUDE O *et al*. Transverse mode transformer [P]. U S Patent:US6377726 B1,2002-04-23.

[7] DANZIGER Y, le ZION R. Optical communication system with chromatic dispersion compensation [P]. U S Patent:US6404952 B1,2002-06-11.

[8] DANZIGER Y,ASKEGARD D. High-order mode fiber:an innovative approach to chromatic dispersion management that enables optical networking in long-haul high-speed transmission systems [J]. Optical Networks,2001,2(1/2):40～50.

版权所有 《激光技术》编辑部