

保偏光纤光栅高温及应力传感特性研究

刘鑫,刘颖刚,梁星,段维维,杨武海

(西安石油大学 光电油气井与检测教育部重点实验室,陕西 西安 710065)

摘要:基于光纤光栅理论,制作了一种熊猫型保偏光纤光栅,并用实验验证了其温度和轴向应力响应特性,根据实验结果对比分析了温度逐渐升高和轴向应力逐渐增大时功率的变化情况。结果表明,熊猫型保偏光纤光栅在100~550℃高温范围内具有稳定的波长响应特性,其双峰的波长灵敏度分别为14.3 pm/℃和14.4 pm/℃,线性拟合度均高达99.9%;在0~2.4 N范围内,双峰的轴向应力响应灵敏度分别高达1.477 nm/N和1.490 nm,线性灵敏度均高达99.9%;随着温度和轴向应力的增大,反射光谱对功率变化情况的响应也不相同。该保偏光纤光栅结构简单,所测温度范围较广,且轴向应力敏感系数较大,具有广泛的应用前景。

关键词:保偏光纤光栅;传感;高温特性;轴向应力特性;功率变化

中图分类号: TN253

文献标识码: A

DOI: 10.11977/j.issn.1004-2474.2018.01.015

Study on High Temperature and Stress Sensing Characteristics of Polarization Maintaining Fiber Grating

LIU Xin, LIU Yinggang, LIANG Xing, DUAN Weiwei, YANG Wuhai

(Ministry of Education Key Lab. of Photoelectric Oil-gas Logging and Detecting, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China)

Abstract: Based on the theoretical analyses and experimental verification of the temperature and the axial stress response characteristics, a panda-type polarization maintaining fiber grating is fabricated, and according to the experimental results, we comparatively analyze the power variation under the circumstance that the temperature and the axial stress are increased gradually. The experimental results show that the panda-type polarization maintaining fiber grating in high temperature of 100~550℃ has stable wavelength response characteristics, and its bimodal wavelength sensitivity are 14.3 pm/℃ and 14.4 pm/℃ respectively, the linear fitting is as high as 99.9%. Within the scope of 0~2.4 N, the bimodal axial stress response sensitivity is as high as 1.477 nm/N and 1.490 nm/N respectively, and its linear sensitivity is as high as 99.9%. With the increase of temperature and axial stress, the response of the reflection spectrum to the power variation is different. The polarization maintaining fiber grating has the advantages of simple structure, wide temperature range and large axial stress sensitivity coefficient, and has wide application prospects.

Key words: polarization maintaining fiber grating; sensing; high temperature characteristics; axial stress characteristic; power variation

0 引言

光纤光栅是在光纤的纤芯沿轴向方向引入周期性的折射率调制而形成的一种光无源器件^[1-2]。由于光纤光栅具有体积小,精度高,结构简单,插入损耗低及与光学系统兼容性好等特性,使其被广泛应用于各种复杂场合。利用其替代传统电子传感器

时,能获得更精确以及灵敏的测量数据^[3-4]。为满足不同领域、不同对象的传感需要,科研人员将普通光纤光栅与其他光纤进行组合或在不同类型的光纤上写入性能不同的光纤光栅,如何伟^[5]和姜德生^[6]等人在多模光纤上刻栅,并用实验分别研究了多模光纤光栅的轴向应变和温度传感特性;刘文杰^[7]将一个

收稿日期: 2017-05-05

基金项目: 国家级大学生创新创业训练计划基金资助项目(201610705020);陕西省自然科学基金基础研究计划基金资助项目(2013JM8032);西安石油大学研究生创新基金资助项目(YCS16211031)。

作者简介: 刘鑫(1993-),女,陕西人,硕士生,主要从事光纤微结构器件制作与特性的研究。通信作者:刘颖刚(1977-),男,副教授,硕士,主要从事光纤传感技术与应用方面的研究。E-mail: ygliu@xsyu.edu.cn。

普通光纤光栅与一个锥形多模光纤光栅结合,并利用这个传感器实现了应力和温度的同步传感;Chao Li 等^[8]将四芯光纤与光纤光栅结合设计制作了同时测量折射率、温度和应变传感特性的传感器。而保偏光纤是一种特殊的单模光纤,它的两个垂直偏振态的传输常数相差较大,在传输过程中不会发生能量交换,故在保偏光纤上刻入光纤光栅时,会出现特有的双峰结构,其独特的双峰结构在很多方面有着其特定的应用^[9-13]。苗飞等^[14]理论分析并用实验验证了保偏布喇格光纤光栅(PMFBG)的应力和温度传感特性,得到 PMFBG 的快慢轴的温度敏感系数分别为 11.89 pm/°C 和 11.32 pm/°C,轴向应力的敏感系数分别为 4.70 pm/N 和 4.50 pm/N,然而该 PMFBG 只测到传统温度,温度范围较小,且轴向应力敏感系数较小,应用前景较局限。

本文理论分析了熊猫型保偏光纤光栅的温度和轴向应力传感原理,得到了熊猫型保偏光纤光栅传感特性的影响因素及变化趋势,再以实验测量保偏光纤光栅在高温及逐渐施加轴向应力下的反射光谱来验证理论分析结果,得到熊猫型保偏光纤光栅两峰的中心波长与温度、轴向应力的响应趋势及变化灵敏度,并根据实验结果对比分析了温度逐渐升高和轴向应力逐渐增大时功率变化情况。

1 实验原理

由于保偏光纤快慢轴的有效折射率不同,所以在保偏光纤上写入光栅后可得到类似于两个光栅的两个波峰,其光栅周期 Λ 相同,有效折射率分别表示为 n_{eff}^x 和 n_{eff}^y 。则两轴的中心波长^[14-16]可分别表示为

$$\lambda^x = 2\Lambda n_{\text{eff}}^x \quad (1)$$

$$\lambda^y = 2\Lambda n_{\text{eff}}^y \quad (2)$$

1.1 温度传感原理分析

当温度 T 变化时, λ^x 和 λ^y 也分别随之变化。

由式(1)、(2)两边分别对温度求导可得^[17]

$$\frac{\Delta\lambda^i}{\lambda^i} = \left(\frac{1}{n_{\text{eff}}^i} \frac{dn_{\text{eff}}^i}{dT} + \frac{1}{\Lambda} \frac{d\Lambda}{dT} \right) (T - T_0) \quad (3)$$

$i = x, y$

式中 $T - T_0$ 代表温度的变化。定义 $\alpha_n = \frac{1}{n_{\text{eff}}} \frac{dn_{\text{eff}}}{dT}$,

$\alpha_\Lambda = \frac{1}{\Lambda} \frac{d\Lambda}{dT}$,其中 α_n 为光纤光栅的热膨胀系数, α_Λ 为光纤的热膨胀系数。由式(3)可知,光纤的材料确定

后,保偏光纤光栅与温度变化之间具有良好的线性输出关系。

1.2 轴向应力传感原理分析

当温度恒定时,对光纤光栅进行沿轴向的拉伸或挤压,会导致 Λ 的变化,并且由于光纤本身具有弹光效应,也会使其有效折射率随着外界应力状态的变化而改变。对式(1)、(2)取导数可得保偏光纤光栅波长漂移与它所受应力的关系式^[18]为

$$\lambda^i = 2 \frac{d\Lambda}{dT} \Delta L n_{\text{eff}}^i + 2\Lambda \left(\frac{dn_{\text{eff}}^i}{dL} \cdot \Delta L + \frac{dn_{\text{eff}}^i}{d\alpha} \cdot \Delta\alpha \right) \quad (4)$$

式中: ΔL 为光纤的纵向伸缩量; $\frac{dn_{\text{eff}}^i}{d\alpha}$ 为光纤的波导效应; $\frac{dn_{\text{eff}}^i}{dL}$ 为光纤的弹光效应; $\Delta\alpha$ 为由于轴向拉伸或挤压所引起的光纤直径的变化。

由于光纤光栅是各向同性柱体结构,其 3 个坐标变量分别为 (r, θ, z) 。因此在柱坐标系下,光纤上施加的应力可分解为 $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z$ 3 个方向。忽略切向应力,此时各向应力分别为 $\sigma_{zz} = -P, \sigma_{rr} = \sigma_{\theta\theta} = 0$ 。忽略波导效应,只研究光纤光栅反射模的 n_{eff} ,则余项可变形为

$$\lambda^i = 2\Lambda \left[-\frac{n_{\text{eff}}^3}{2} \Delta \left(\frac{1}{n_{\text{eff}}^2} \right) \right] + 2n_{\text{eff}}^i \epsilon_{zz} L \frac{d\Lambda}{dT} \quad (5)$$

式中 $\epsilon_{zz} = \frac{\Delta L}{L}$ 为纵向伸缩应变。当外界应力存在时,相对介电抗参张量 β_{ij} 是应力 σ 的函数,对 β_{ij} 进行泰勒展开并略去高阶项,同时引入材料的弹光参数 ρ_{ij} ,由于均匀光栅具有的轴对称性,可得到由弹光效应引起的相对波长漂移为

$$\frac{\Delta\lambda^i}{\lambda^i} = \frac{n_{\text{eff}}^2}{2} [(\rho_{11} + \rho_{12})\epsilon_{zz} + \rho_{12}\epsilon_{zz}] + \epsilon_{zz} \quad (6)$$

再根据 Hook 定律即可得

$$\frac{\Delta\lambda^i}{\lambda^i} = \left\{ 1 - \frac{n_{\text{eff}}^2}{2} [(\rho_{12} - (\rho_{11} + \rho_{12})\nu)] \right\} \epsilon_{zz} \quad (7)$$

式中 ν 为光纤的泊松比。由式(6)可得,光纤的材料确定后,保偏光纤光栅与轴向应力变化之间具有良好的线性输出关系。

2 实验及结果分析

实验过程中,所用光栅是用紫外光透过相位掩模版照射熊猫型保偏光纤得到的,利用解调仪 SM125 测量保偏光纤光栅的反射光谱。在保持室

温及不施外力情况下,保偏光纤光栅的反射谱如图 1 所示,其中心波长分别为 1 555. 505 7 nm 和 1 555. 907 0 nm。

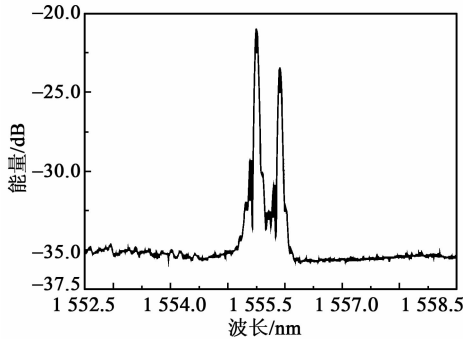


图 1 常温、不施力时保偏光纤光栅反射光谱

2.1 温度特性实验

将待测保偏光纤光栅悬空置于温箱中加热,实验装置如图 2 所示。从室温 20 ℃起逐步加热至 550 ℃,当温度升高趋势稳定后,从 100 ℃开始,每隔 50 ℃记录 1 次,为了确保实验数据真实有效,每次都待温度稳定 3 min 后再记录数据,得到光谱图如图 3 所示。分析峰值波长如图 4 所示。图 4 中

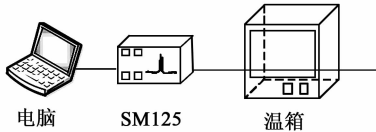


图 2 温度实验装置图

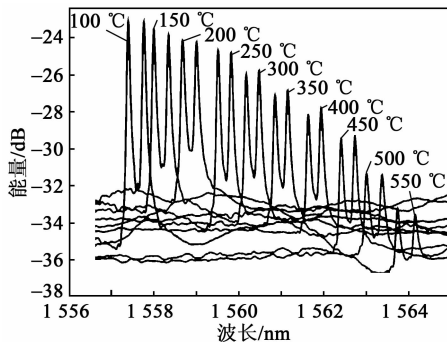


图 3 光栅在不同温度下的反射谱

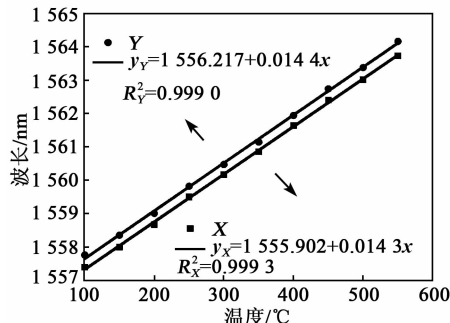


图 4 波长与温度的关系

X, Y 分别代表保偏光纤光栅的快慢轴,其线性拟合式分别用 y_X, y_Y 表示,线性拟合度用 R_X^2, R_Y^2 表示。由图 4 可见,两峰的中心波长都随着温度的升高向长波方向发生漂移。温度在 x、y 两个方向上的响应分别为 14.3 pm/℃和 14.4 pm/℃,且线性拟合度均在 0.99 以上。

2.2 轴向应力特性实验

在常温下,将待测保偏光纤光栅的两端固定在两个平移台上,实验装置如图 5 所示。保持一个平移台不动,移动另一个平移台使光纤轴向被拉伸。实验过程中,每施加 0.4 N,记录 1 次数据,得到的光谱图如图 6 所示。对其峰值波长进行分析,如图 7 所示。由图 6 可以看见,两峰的中心波长都随着轴向应力的增大向长波方向发生漂移。其中,轴向应力在 x、y 方向上的响应分别为 1.477 nm/N 和 1.490 nm/N,且线性拟合度均在 0.99 以上。

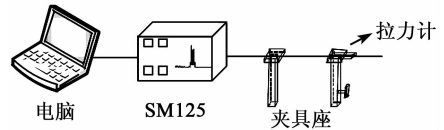


图 5 轴向应力实验装置图

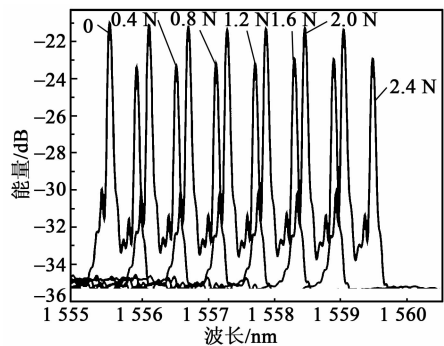


图 6 光栅在不同应力下的光谱

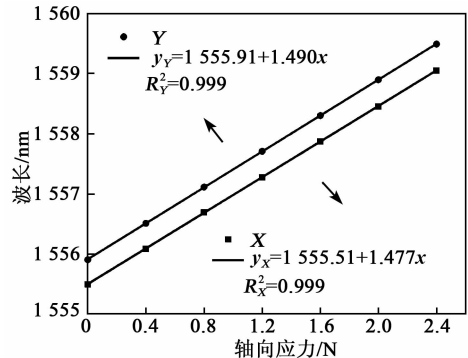


图 7 波长与轴向应力的变化关系

分析对比图 3、6 可知,在图 3 中,当温度高于 200 ℃时,熊猫型保偏光纤光栅反射光谱的功率随着温度升高而急剧下降,当温度升至 550 ℃时,其反

射光谱的功率只有 2 dB;而在图 6 中,随着轴向应力的增大反射光谱的功率并无变化。这是由于高温诱导光敏性使光纤的折射率发生了变化。利用紫外曝光光纤诱导其光敏性导致折射率变化而形成的缺陷即是光纤光栅。温度、应力、外部光源的照射都可以使折射率变化消失。普通光纤光栅只能工作在室温到 200 ℃,当温度超过 200 ℃时,温度的持续升高激发了与缺陷中心相关的能量陷阱,这样可以部分或全部清除折射率的变化,加热的能量也可能使得纤芯出现中期或长期的结构变化;而利用应力清除因光敏性而产生的折射率变化时,所需要的应力远大于让材料断裂产生的应力。因此,温度从 200 ℃升至 550 ℃的过程中,保偏光纤光栅反射光谱的功率急剧下降,而增加轴向应力时反射光谱的功率并无变化^[19]。

3 结束语

本文通过对熊猫型保偏光纤光栅传感特性的理论分析,得到保偏光纤光栅双峰的中心波长与温度、轴向应力的变化关系,并得出结论:在温度逐渐升高或轴向应力逐渐增大的情况下,保偏光纤光栅两峰的中心波长均会呈现线性变化趋势,再通过实验对其进行验证,并根据实验结果对比分析了温度逐渐升高和轴向应力逐渐增大时功率的变化情况。实验结果表明,熊猫型保偏光纤光栅两峰的中心波长与温度、轴向应力之间均具有良好的一次线性输出关系。当温度升高时,两峰的中心波长均向长波方向漂移,在 100~550 ℃高温范围内其 x 、 y 方向的灵敏度分别为 14.3 pm/℃ 和 14.4 pm/℃;在轴向应力为 0~2.4 N 范围内其两个方向上的响应分别为 1.477 nm/N 和 1.490 nm/N,线性拟合度均高达 99.9%。从温度和轴向应力的光谱图中可看出,当温度超过 200 ℃时,保偏光纤光栅反射光谱的功率急剧下降,而增大施加在光纤光栅轴向的应力对反射谱的功率并无影响。该保偏光纤光栅制作方法简单,所测温度范围较广,且具有较大的轴向应力敏感系数和高线性度,在生物化学、工程应用、工业生产和环境检测中具有一定的应用前景。

参考文献:

- [1] 姜明顺.长周期光纤光栅理论及传感技术研究[D].济南:山东大学,2010.
- [2] 王伟,孟洲,杨华勇,等.熊猫型保偏光纤光栅温度和应力传感特性研究[J].传感器世界,2006,6(12):23-26.
- [3] 覃付祥,郭宁,孟庆友.熊猫型保偏光纤应力分布模拟放大实验研究[J].南开大学学报(自然科学版),2008,41(2):47-50.
- [4] 何伟,徐先东,姜德生.聚合物封装的高灵敏度光纤光栅温度传感器及其低温特性[J].光学学报,2004,24(10):1316-1319.
- [5] 何伟,李剑芝,陈宏波,等.多模光纤光栅的应变传感特性[J].传感器技术,2003,22(12):15-17.
- [6] 姜德生,李剑芝,梅家纯.多模光纤光栅温度传感特性的实验研究[J].光学学报,2004,24(2):175-178.
- [7] 刘文杰.基于锥形光纤光栅的应力与温度同步传感技术研究[J].科技风,2010,18:238-239.
- [8] LI Chao, NING Tigang, LI Jing. Simultaneous measurement of refractive index, strain, and temperature based on a four-core fiber combined with a fiber Bragg grating[J]. Optics & Laser Technology, 2017, 90: 179-184.
- [9] FENG Suchun, PENG Jian, PENG Wanqing. Single-polarization, single-longitudinal-mode erbium-doped fiber laser based on twisting of polarization-maintaining fiber Bragg gratings[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(1): 0102002-1-0102002-7.
- [10] TONG Zhongrong, ZHAO Jinting, YANG Xiufeng. Simultaneous measurement of axial strain and temperature using a PM fiber Bragg grating[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2011, 53(4): 867-870.
- WANG Wei, MENG Zhou, YANG Huayong, et al. The research of temperature and press sensing characteristics on PMFBG[J]. Sensor World, 2006, 6(12): 23-26.
- QIN Fuxiang, GUO Ning, MENG Qingyou. Study on the experiment to imitate and enlarge the distribution of stress in panda birefringence fiber[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Nankaiensis, 2008, 41(2): 47-50.
- HE Wei, XU Xiandong, JIANG Desheng. High-sensitivity fiber Bragg grating temperature sensor with polymer jacket and its low-temperature characteristic[J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(10): 1316-1319.
- JIANG Desheng, LI Jianzhi, MEI Jiachun. Temperature sensing properties of multimode fiber grating[J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(2): 175-178.
- LIU Wenjie. Study on simultaneous sensing of stress and temperature based on tapered fiber grating[J]. Technology Wind, 2010, 18: 238-239.