

液氮温度下裸光纤布拉格光栅弹光系数实验测量

余 顶¹, 张东生^{*2}, 聂 铭¹, 张春峰²

(1. 武汉理工大学 光纤传感与信号处理教育部重点实验室, 湖北 武汉 430070;

2. 武汉理工大学 光纤传感技术国家工程实验室, 湖北 武汉 430070)

摘要: 研究了裸光纤布拉格光栅(FBG)的低温应变特性,采用静态拉伸实验逐对记录 FBG 中心波长和加载应力,通过理论推导得到理论应变,并将其与相对波长变化量的关系曲线进行线性拟合,求出裸光纤布拉格光栅在常温和液氮温度下的有效弹光系数.此种实验方式消除了传统实验方式(将光栅粘在金属基片上)应变传递对测量结果的影响,使测量结果更准确.结果发现液氮温度下相对波长变化量 $\Delta\lambda_B/\lambda_B$ 与应变 ϵ 呈线性关系,测得常温和液氮温度下弹光系数分别为 0.25 和 0.23.

关键词: 裸光纤布拉格光栅;应变特性;液氮;弹光系数

中图分类号: TN253

文献标识码: A

doi:10.7511/dllgxb201606011

0 引 言

近年来,光纤光栅传感器因其抗电磁干扰、耐腐蚀、体积小、重量轻、测量对象广泛、测量精度高并且便于复用组网而得到广泛的认可和应用^[1].尤其在很多低温工程中,诸如超强磁场、能源、核聚变、空间技术以及生命科学等^[2],光纤光栅传感器因其具有抗电磁干扰以及易于嵌入结构体内部等独特的优势获得人们越来越多的关注^[3].针对低温环境下光纤光栅传感器的相关特性^[4],国内外不少研究人员进行了实验分析和理论研究.然而大多研究的是其温度特性^[5-6],对低温环境下的应变特性研究较少.2007年,黄国君等研究了液氮温度下光纤布拉格光栅(FBG)的应变传感特性,实验发现常温和液氮温度下,FBG的应变灵敏度系数相同^[7];2011年,付荣设计了一种基片式封装的FBG传感器并在液氮温度下进行拉伸实验,测得该传感器在液氮温度下的有效弹光系数为0.09^[8];2012年,Guo等在123~273 K的温度区间内进行光纤光栅的应变传感实验,结果发现波长变化量和轴向应变呈线性关系,并且应变灵敏度系数随温度负增长,但其实验温度受限没

有到达77 K^[9].本文通过在常温和液氮温度下对裸光纤布拉格光栅进行静态拉伸实验,研究其应变传感特性,进而测得常温和液氮温度下裸光纤布拉格光栅的有效弹光系数.

1 FBG 应变传感原理

FBG 是利用掺杂光纤的光敏性,采用干涉仪紫外曝光、化学腐蚀等方式在光纤的纤芯内部形成有规律的折射率调制.对于FBG,一般满足

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (1)$$

的入射光会被反射.其中 λ_B 为 FBG 的中心波长, n_{eff} 为纤芯的有效折射率, Λ 为光纤光栅周期.

当外界温度变化时,热光效应和热膨胀效应会改变 FBG 的有效折射率和周期;当受到一均匀轴向应变时,产生轴向拉伸直接改变光纤光栅的周期,同时由于存在弹光效应也会使纤芯折射率发生变化,这两者均会影响 FBG 中心波长.当外界温度稳定时,FBG 仅受轴向应力,式(1)可写为

$$\Delta\lambda_B = 2\Delta n_{\text{eff}}\Lambda + 2n_{\text{eff}}\Delta\Lambda \quad (2)$$

上式经过 Hookie 定理和相应的数学推导可得到中心波长漂移量和应变的关系式:

$$\Delta\lambda_B = (1 - P_e)\lambda_B\epsilon = k_e \cdot \epsilon \quad (3)$$

$$\Delta\lambda_B/\lambda_B=(1-P_e)\epsilon \tag{4}$$

其中 $\Delta\lambda_B$ 为 FBG 波长漂移量, P_e 为光纤的弹光系数, λ_B 为 FBG 的初始波长, k_e 为应变灵敏度系数, ϵ 为轴向应变. 在常温下对于石英光纤, $P_e=0.22^{[3]}$, 因此对于中心波长为 $1.3\text{ }\mu\text{m}$ 的光纤光栅, 其应变灵敏度系数 $k_e=1\text{ pm}/10^{-6}$; 对于中心波长为 $1.5\text{ }\mu\text{m}$ 的光纤光栅, 其应变灵敏度系数 $k_e=1.2\text{ pm}/10^{-6}$.

2 实验过程及数据分析

常温(25 ℃)下的拉伸实验装置较为简单, 不做描述. 液氮温度(77 K)下拉伸实验方案是将裸光纤布拉格光栅两端用快干胶粘上夹具(夹具材料质量可忽略不计), 一端夹具挂上重物浸入液氮中, 另一端夹具通过拉力计固定并测量 FBG 受到的轴向拉力, 实验采用重物裸重分别为 0.9、1.7、2.5、3.6、4.5 N. 当浸入液氮时, 浮力作用会使 FBG 受到的实际轴向拉力减小, 经测量拉力分别为 0.75、1.50、2.30、3.10、3.90 N, 尾纤引出接上解调仪和电脑实时记录 FBG 中心波长. 实验采用的拉力计量程为 20 N, 精度为 0.1 N, 解调仪采用实验室自主研发的解调仪, 可识别中心波长范围为 1 520~1 580 nm, 分辨率为 1 pm. 实验准备了 3 组试件, 标号为 1、2、3, 中心波长分别为 1 546、1 526、1 567 nm, 均为商业购买, 光栅处涂覆层已剥去, 每组试件在常温和液氮温度下均重复 3 次拉伸实验. 液氮温度下的拉伸实验较为复杂, 将试件完全浸入液氮中, 观察解调仪界面的反射光谱, 待光栅波长完全稳定后, 记录此时反射波长, 再将试件取出更换重物重复实验. 实验装置如图 1 所示.

试件受到拉力 F 作用后其应变 ϵ 可由下式计算得到:

$$\epsilon=F/EA \tag{5}$$

其中 E 为材料的弹性模量, A 为横截面积. 室温下, 光纤的弹性模量 $E=72\text{ GPa}$; 液氮温度下, 其弹性模量 $E=70\text{ GPa}^{[10]}$. 光纤直径一般为 $125\text{ }\mu\text{m}$.

光纤光栅试件浸入液氮时, 由于环境温度降低其中心波长会发生蓝移, 但是反射光谱质量良好, 并未出现多峰、峰值降低等啁啾异常现象^[11], 因此不会影响其低温应变传感. 图 2 给出了中心波长为 1 567 nm 的 FBG 试件不受外加拉力条件下浸入液氮前后的反射光谱. 从图中可以看出, 浸入液氮后由于温度降低其波长向短波长方向漂移了 1.4 nm, 谱强度略增强.

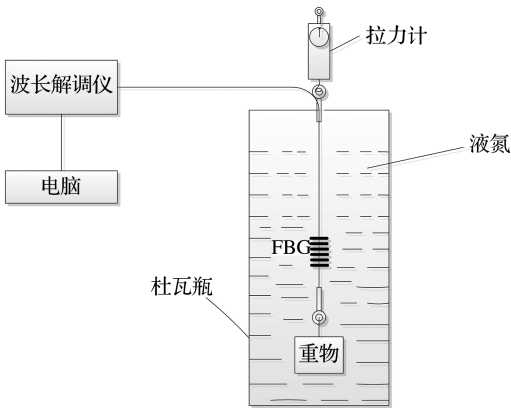
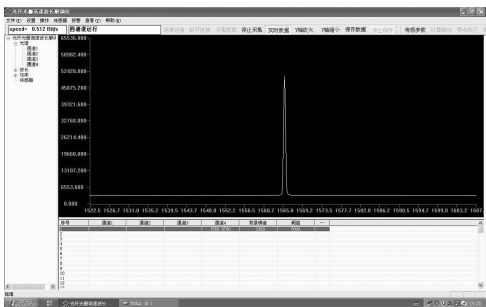
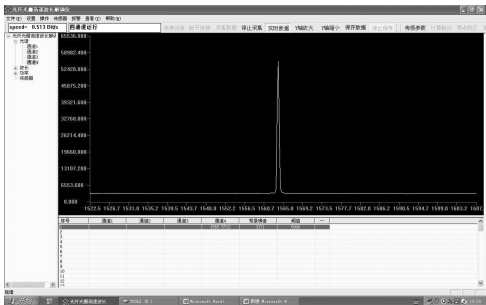


图 1 液氮环境拉伸实验装置示意图
Fig. 1 Schematic diagram of the tensile experiment in liquid nitrogen environment



(a) 常温



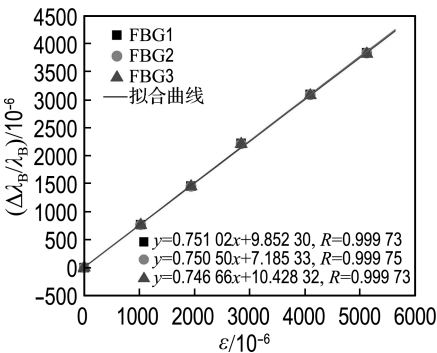
(b) 液氮温度

图 2 1 567 nm 波长 FBG 试件反射光谱

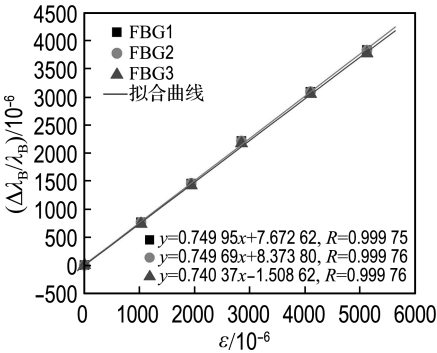
Fig. 2 Reflection spectra of FBG at 1 567 nm wavelength

将 3 组试件的拉伸实验数据用 Origin 进行描点、线性拟合, 即可得到相对波长变化量 $\Delta\lambda_B/\lambda_B$ 和应变 ϵ 的关系曲线, 再根据式(4)即可求得对应的有效弹光系数. 图 3、4 分别描述 3 组试件在常温和液氮温度下的拉伸实验数据线性拟合曲线.

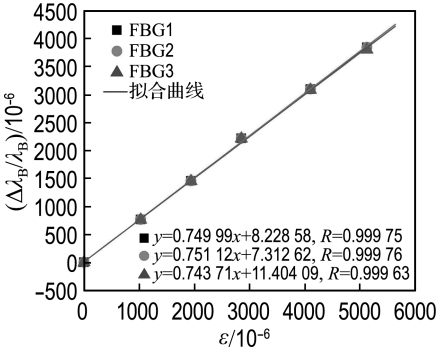
实验结果表明, 每组试件的拉伸实验数据线性度均良好, 拟合系数 $R>0.999$. 由以上每组实验数据的拟合曲线可以得出斜率, 即 $1-P_e$, 也就求出了 P_e 的有效值, 再分别求出 3 组试件在常温和液氮温度下有效弹光系数的平均值. 由表 1 可知, 常温下实验测得有效弹光系数 $P_e=0.25$, 这



(a) 第 1 次常温拉伸

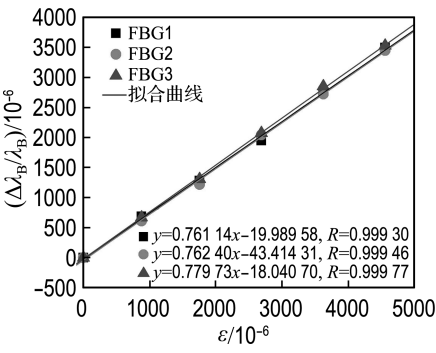


(b) 第 2 次常温拉伸

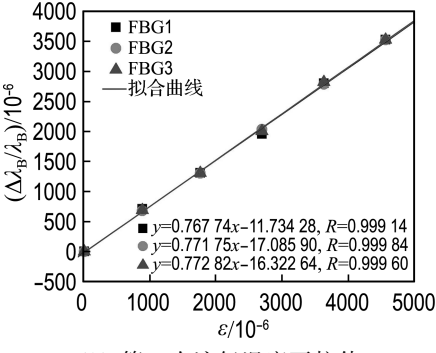


(c) 第 3 次常温拉伸

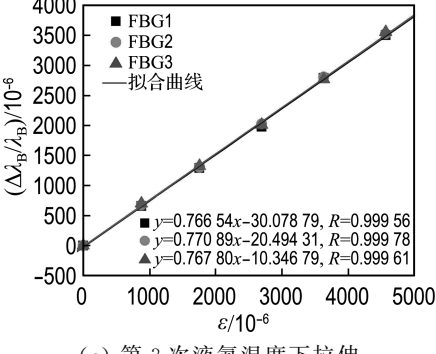
图 3 3 组试件常温拉伸实验数据线性拟合
Fig. 3 Linear fitting of three groups of tensile experiment data in common temperature



(a) 第 1 次液氮温度下拉伸



(b) 第 2 次液氮温度下拉伸



(c) 第 3 次液氮温度下拉伸

图 4 3 组试件液氮温度下拉伸实验数据线性拟合
Fig. 4 Linear fitting of three groups of tensile experiment data in liquid nitrogen temperature

与文献给出的参考值基本一致^[3,8]；液氮温度下实验测得有效弹光系数 $P_e=0.23$ 。

3 组试件在常温和液氮温度下拉伸实验重复性如图 5~7 所示。由图可知，3 组试件的多次拉伸实验的重复性良好，1 号试件常温拉伸重复实验最大波长偏差为 110 pm，约占整个测量范围的 2.00%；液氮温度下拉伸重复实验最大波长偏差为 80 pm，约占整个测量范围的 1.50%。2 号试件常温拉伸重复实验最大波长偏差为 40 pm，约占整个测量范围的 0.70%；液氮温度下拉伸重复实验最大波长偏差为 120 pm，约占整个测量范围的 2.30%。3 号试件常温拉伸重复实验最大波长偏

		表 1 有效弹光系数 P_e					
		FBG1		FBG2		FBG3	
		P_{e1}	$\overline{P}_{e1}$	P_{e2}	$\overline{P}_{e2}$	P_{e3}	$\overline{P}_{e3}$
常温		0.25		0.25		0.25	
		0.25	0.25	0.25	0.25	0.26	0.26
		0.25		0.25		0.26	
液氮温度		0.24		0.24		0.22	
		0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23
		0.23		0.23		0.23	

差为 50 pm，约占整个测量范围的 0.84%；液氮温度下拉伸重复实验最大波长偏差为 110 pm，约占整个测量范围的 2.00%。

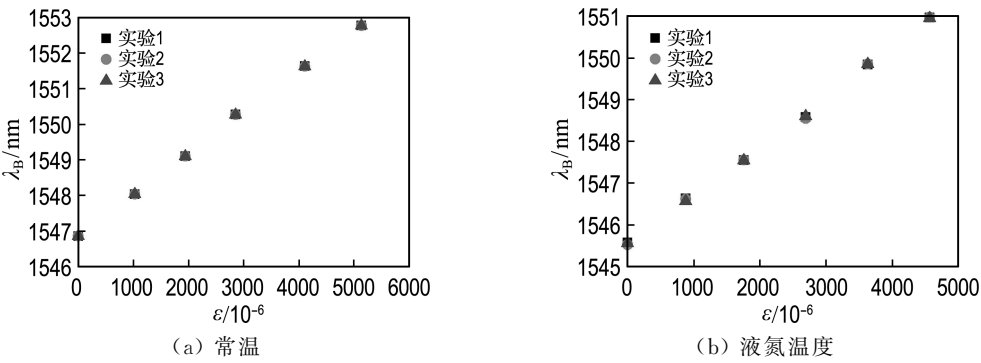


图 5 FBG1 常温和液氮温度下拉伸实验波长重复性

Fig. 5 Wavelength repeatability of FBG1 in tensile experiment at common and liquid nitrogen temperature

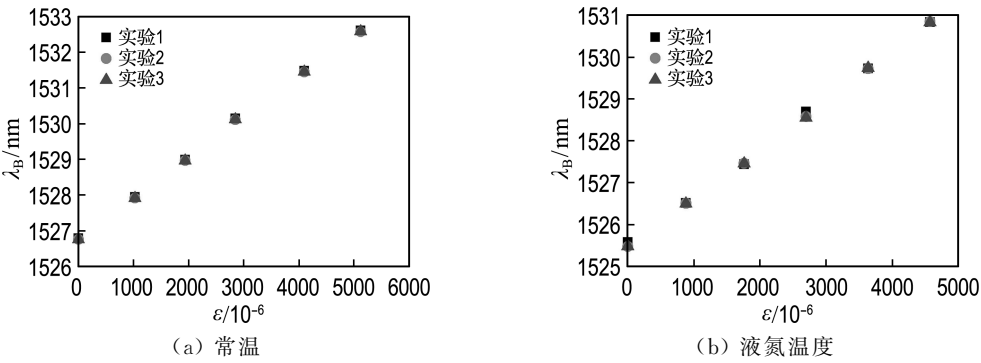


图 6 FBG2 常温和液氮温度下拉伸实验波长重复性

Fig. 6 Wavelength repeatability of FBG2 in tensile experiment at common and liquid nitrogen temperature

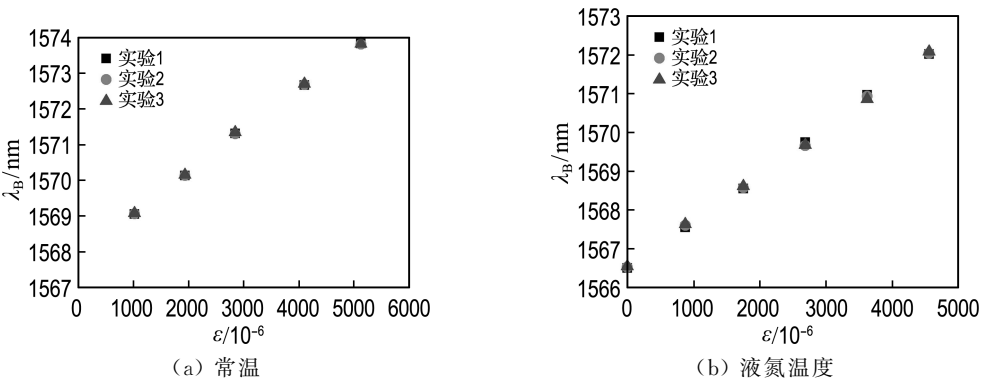


图 7 FBG3 常温和液氮温度下拉伸实验波长重复性

Fig. 7 Wavelength repeatability of FBG3 in tensile experiment at common and liquid nitrogen temperature

3 结 语

通过对 3 组试件进行重复静态拉伸实验,研究了光纤光栅的低温应变特性,并测得了裸光纤布拉格光栅在常温和液氮温度下的有效弹光系数 P_e . 实验测得常温下的有效弹光系数 $P_e=0.25$,液氮温度下的有效弹光系数 $P_e=0.23$,且每组试件应变实验的重复性良好,证明裸光纤布拉格光栅在常温和液氮温度下应变特性均很稳定. 本文创新点在于直接对裸光纤布拉格光栅进行静态拉伸实验,与

将光纤光栅粘在基片(铝片等)的传统实验方式不一样,大大简化了实验过程,避免了粘贴过程中由于胶黏剂涂抹不均匀出现的啁啾问题^[11],消除了应变传递对实验结果的影响. 通过对比常温和液氮温度下有效弹光系数,发现液氮温度下的弹光系数小于常温下的弹光系数,而弹光系数直接与应变灵敏度相关,这对光纤光栅的低温应变特性研究具有一定积极意义. 由于实验设备需要进一步改进,需要更多次的测量以得到更准确的液氮温度下弹光系数.

参考文献:

- [1] 孙 丽. 光纤光栅传感技术与工程应用研究 [D]. 大连:大连理工大学, 2006.
SUN Li. Research of fiber Bragg grating sensing technology and engineering application [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006. (in Chinese)
- [2] Leung C K Y, WAN Kai-tai, Inaudi D, *et al.* Review: optical fiber sensors for civil engineering applications [J]. **Materials and Structures**, 2015, **48**(4):871-906.
- [3] 李杰燕. 高低温环境下光纤传感的传感特性及相关技术研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2013.
LI Jie-yan. Sensing property and technology research on fiber optic sensing in high and low temperature environment [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2013. (in Chinese)
- [4] Zaynetdinov M, See E M, Geist B, *et al.* A fiber Bragg grating temperature sensor for 2-400 K [J]. **IEEE Sensors Journal**, 2015, **15**(3):1908-1912.
- [5] 蔡国利, 简 伟. 光纤光栅在液氮温区温度传感性能的研究[J]. 光通信研究, 2006(6):56-57.
CAI Guo-li, JIAN Wei. Experiment on FBG temperature sensor in cryogenic environment [J]. **Study on Optical Communications**, 2006(6):56-57. (in Chinese)
- [6] 郭明金, 姜德生, 王玉华. 裸光纤光栅及其封装后的低温特性[J]. 武汉理工大学学报, 2006, **28**(8):113-116.
GUO Ming-jin, JIANG De-sheng, WANG Yu-hua. Low temperature characteristics of the bare fiber Bragg grating and its package [J]. **Journal of Wuhan University of Technology**, 2006, **28**(8):113-116. (in Chinese)
- [7] 黄国君, 邵进益, 王秋良, 等. 液氮温度光纤 Bragg 光栅的应变传感特性[J]. 光电子·激光, 2007, **18**(7):773-775.
HUANG Guo-jun, SHAO Jin-yi, WANG Qiu-liang, *et al.* Strain response of FBG at liquid nitrogen temperature [J]. **Journal of Optoelectronics · Laser**, 2007, **18**(7):773-775. (in Chinese)
- [8] 付 荣. 光纤 Bragg 光栅低温传感特性研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2011.
FU Rong. Study on sensing characteristic of fiber Bragg grating at cryogenic temperature [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2011. (in Chinese)
- [9] GUO Zhan-sheng, FENG Jie-min, WANG Hui. Cryogenic temperature characteristics of the fiber Bragg grating sensors [J]. **Cryogenics**, 2012, **52**(10):457-460.
- [10] 韩 鹏. 高温下光纤的机械强度性能研究[D]. 上海:华东理工大学, 2013.
HAN Peng. Mechanical strength characteristics of optical fibers in the high-temperature environments [D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2013. (in Chinese)
- [11] 周建华, 张东生, 付 荣. 低温环境下光纤光栅啁啾异常现象研究[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2010, **32**(5):733-737.
ZHOU Jian-hua, ZHANG Dong-sheng, FU Rong. Abnormality of fiber Bragg grating spectrum at cryogenic temperatures [J]. **Journal of Wuhan University of Technology (Information & Management Engineering)**, 2010, **32**(5):733-737. (in Chinese)

Experimental measurement of elastic-optic coefficient of bare fiber Bragg grating at liquid nitrogen temperature

YU Ding¹, ZHANG Dong-sheng^{*2}, NIE Ming¹, ZHANG Chun-feng²

(1. Key Laboratory of Fiber Optic Sensing Technology and Information Processing of MEC, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

2. National Engineering Laboratory for Fiber Optic Sensing Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: The strain characteristics of bare fiber Bragg grating (FBG) at cryogenic temperature are studied. The static tensile experiments are carried out to record the central wavelength of FBG and the force in pair. Then, the linear fitting of relative wavelength variation and strain which is worked out through theoretical derivation can be performed. Afterwards, the valid elastic-optic coefficients of bare fiber Bragg grating at normal and liquid nitrogen temperature are determined. This experimental way eliminates the influence caused by the traversal of stress in traditional experiment (adhering FBG to metal chip) and makes the result preciser. It turns out that it is linear relationship between the relative wavelength variation $\Delta\lambda_B/\lambda_B$ and the strain ϵ at liquid nitrogen temperature. Moreover, the measured elastic-optic coefficient at normal and liquid nitrogen temperature is respectively 0.25 and 0.23.

Key words: bare fiber Bragg grating; strain characteristics; liquid nitrogen; elastic-optic coefficient