

# 飞秒激光制备异质光纤光栅的温度应变双参数传感器

曹后俊<sup>1</sup>, 司金海<sup>1</sup>, 陈涛<sup>1</sup>, 王瑞泽<sup>1</sup>, 高博<sup>2</sup>, 闫理贺<sup>1</sup>, 侯洵<sup>1</sup>

<sup>1</sup>西安交通大学电子与信息工程学院电子物理与器件教育部重点实验室,

陕西省信息光子技术重点实验室, 陕西 西安 710049;

<sup>2</sup>西安理工大学理学院, 陕西 西安 710048

**摘要** 针对光纤布拉格光栅(FBG)传感器在应用中温度与应变串扰的问题,利用飞秒激光结合相位掩模板法在异质光纤熔接点处刻写 FBG,基于 FBG 的温度或应变响应系数的特点,实现温度与应变双参量的传感测量。分别标定了掺镱-石英 FBG 和 钕共掺-石英 FBG 的温度和应变响应系数,结果表明,钕共掺 FBG 和石英 FBG 的温度响应系数差异较大,应变响应系数相近,故可用作温度、应变双参数传感测量。经过 800 °C 的高温退火的钕共掺-石英异质 FBG 在 700 °C 温度下可保持长时间反射率稳定,因此可应用于 700 °C 以内的温度和应变双参量解调。

**关键词** 光纤光学; 光纤布拉格光栅; 温度应变双参量传感; 飞秒激光加工; 相位掩模

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0702009

## Temperature and Strain Dual-Parameter Heterogeneous Fiber Bragg Grating Sensor Made by Femtosecond Laser

Cao Houjun<sup>1</sup>, Si Jinhai<sup>1</sup>, Chen Tao<sup>1</sup>, Wang Ruize<sup>1</sup>, Gao Bo<sup>2</sup>, Yan Lihe<sup>1</sup>, Hou Xun<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory for Physical Electronics and Devices of the Ministry of Education, Shaanxi Key Laboratory of Information Photonic Technique, School of Electronic & Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China;

<sup>2</sup>School of Sciences, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China

**Abstract** Aiming at the crosstalk of temperature and strain existing in the fiber Bragg grating (FBG) sensor, we use a femtosecond laser and a phase mask to fabricate FBGs in the melting point of two heterogeneous fibers. Because temperature or strain response parameters of the FBGs are different, the simultaneous measurements of temperature and strain can be realized. Temperature and strain response parameters of two kinds of FBGs, including Yb<sup>3+</sup> doped fiber with SMF-28 fiber FBGs and Er:Yb doped fiber with SMF-28 fiber FBGs, are measured, respectively. The results indicate that the Er:Yb doped FBG has a great difference on temperature response parameter but a similar strain response parameter with the SMF-28 fiber FBG, so the Er:Yb doped fiber with SMF-28 fiber FBGs can be used to realize the simultaneous sensing on temperature and strain measurement. After annealing at 800 °C, the reflectivity of Er:Yb doped fiber FBG with SMF-28 fiber FBG can maintain a long-term stability at 700 °C. It can be used to realize the temperature-strain dual-parameter demodulation below 700 °C.

**Key words** fiber optics; fiber Bragg grating; temperature-strain dual-parameter sensing; femtosecond laser micromachining; phase mask

**OCIS codes** 060.3735; 320.2250; 060.2370

收稿日期: 2017-12-19; 收到修改稿日期: 2018-02-03

基金项目: 陕西省重点研发计划(2017ZDXM-GY-120)、苏州市科技计划项目重点产业技术创新-前瞻性应用研究(SYG201622)、中央高校基本科研业务费专项资金(xj2016016)

作者简介: 曹后俊(1992—),男,硕士研究生,主要从事光纤光栅传感及解调方面的研究。E-mail: caohj@snnu.edu.cn

导师简介: 司金海(1960—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事超快光子技术及其应用方面的研究。

E-mail: jinhaisi@mail.xjtu.edu.cn(通信联系人)

# 1 引 言

光纤光栅传感器可用于温度、应变、压力、浓度等物理量的传感测量,具有抗电磁干扰、体积小、质量小、兼容智能设备等特点。其工作机理是基于波长编码减少解调光路中光源功率波动带来的测量误差,容易实现分布式传感。光纤光栅传感器在工程工业监测、岩土、桥梁、安防等方面具有重要的应用前景<sup>[1-5]</sup>。

光纤光栅传感器常被用于温度和应变测量。由于温度和应变的变化都可能引起光纤布拉格光栅(FBG)中心波长偏移,因此在实际光纤光栅传感应用中存在温度和应变的交叉串扰问题。解决FBG传感器温度与应变的串扰问题是其实用化的前提<sup>[6-8]</sup>。目前解决交叉串扰问题的方法为采用特殊材料对FBG进行封装<sup>[9]</sup>,抑制温度(应变)的影响,实现应变(温度)的解调,但该方法在封装的过程中需要对FBG预加应力,因此缩小了传感器的测量范围<sup>[10]</sup>。刘凤超等<sup>[11]</sup>提出参考光纤光栅法,通过特殊的封装方法在应变传感FBG附近增加一个温度测量FBG,对应变传感FBG的测量进行温度的补偿。此外,各国科研工作者也提出了多种能同时解调出应变和温度的双参量解调方法。其中一种方法为使用FBG构成法布里-珀罗(F-P)腔,当温度和应变改变时,通过测量光栅布拉格波长的偏移和F-P腔的干涉光谱的变化得到温度和应变的变化量,但是干涉光谱的测量失去了FBG传感波长编码的优点<sup>[12]</sup>;另一种方法是用两个温度、应变系数不完全相同的FBG组合进行温度和应变的测量,同时监测两个光栅的布拉格波长偏移,通过联立两个方程得到温度和应变变化量<sup>[13-16]</sup>。赵洪霞等<sup>[17]</sup>通过用氢氟酸(HF)腐蚀部分FBG,使得两部分FBG的应变响应系数差异较大,而温度响应系数差异较小,从而实现温度和应变的同时测量。关柏鸥等<sup>[18]</sup>先将普通石英光纤和载氢后的铟镱共掺光纤两种异质光纤熔接在一起,用紫外准分子激光在两种光纤连接处刻写FBG,由于两种不同光纤中的光栅结构具有不同的温度响应系数,因此可以用作温度、应变双参量传感测量,异质FBG双参量传感解调只需要一个解调光源,并保留了FBG传感器波长编码特性的优点。但以上方案均是利用紫外准分子激光在光敏光纤中制备FBG。紫外准分子激光对光敏光纤的写入机理是基于纤芯对紫外激光辐射的线性吸收而形成“色心”结构,这种类型的FBG在400℃就会被擦

除<sup>[19]</sup>,很难适用于高温环境。另外紫外光刻写FBG的方法要求光纤必须具有光敏性,对弱光敏光纤则需要经过长时间的载氢处理,限制了该加工方法所适用的光纤范围。飞秒激光脉冲具有超强的峰值功率,可以对各种材料进行加工。利用飞秒激光可以直接在普通石英光纤中加工FBG,不需要载氢处理。所制备的FBG温度稳定性远远高于传统紫外光在光敏光纤制备的FBG,适用温度可达1000℃<sup>[20]</sup>。此外,利用飞秒激光在掺镱、铟镱共掺等光纤中均实现了FBG的直接制备<sup>[21]</sup>,但目前利用异质FBG实现耐高温温度和应变双解调的研究还未见报道。

本文利用飞秒激光在两种异质光纤熔接处刻写FBG,构成异质FBG温度应变双参数传感器。研究了掺镱FBG、铟镱共掺FBG和普通石英FBG三种不同FBG温度和应变响应系数,基于铟镱共掺光纤和普通石英光纤两种异质FBG的温度响应系数不同,利用铟镱共掺-石英异质FBG实现温度应变双参量解调。同时,研究了铟镱共掺-石英FBG的耐温特性,结果表明铟镱共掺-石英FBG温度、应变双参量传感器可用于700℃以内的传感。

## 2 FBG 温度和应变传感原理

### 2.1 FBG 温度和应变传感

FBG的布拉格波长可表示为

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

式中: $m$ 为布拉格波长的阶数; $\lambda_B$ 为FBG的布拉格波长; $n_{\text{eff}}$ 为光纤纤芯的有效折射率; $\Lambda$ 为FBG的周期。FBG所处环境的温度和应变的变化会引起 $n_{\text{eff}}$ 和 $\Lambda$ 发生改变,从而导致 $\lambda_B$ 发生偏移。温度引起的FBG布拉格波长偏移的主要原因可以归结为光纤热膨胀效应和光纤的热光效应<sup>[22-23]</sup>。在只考虑温度变化时,布拉格波长偏移 $\Delta\lambda_B$ 可表示为<sup>[22]</sup>

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(\alpha + \xi)\Delta T = K_T\Delta T, \quad (2)$$

式中: $\alpha$ 和 $\xi$ 分别为光纤的热膨胀系数和热光系数; $\Delta T$ 为温度的变化量; $K_T$ 为FBG布拉格波长偏移对温度 $T$ 的灵敏度。对于掺锗石英光纤 $\alpha = 5.5 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , $\xi = 6.4 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ;当 $\lambda_B = 1550 \text{ nm}$ 时,可得 $K_T = 10.9 \text{ pm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ 。应变引起的FBG布拉格波长偏移的主要原因可以归结为应变致使光栅周期 $\Lambda$ 的伸缩和应变通过光纤的弹光效应使有效折射率 $n_{\text{eff}}$ 改变。当只考虑沿光纤轴向应变时,在轴向应变 $\epsilon_x$ 条件下,布拉格波长偏移可以表示为<sup>[22]</sup>

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1 - p_e)\epsilon_x = K_e\epsilon_x, \quad (3)$$

式中:  $K_e$  为布拉格波长偏移对轴向应变的灵敏度;  $p_e$  为有效弹光系数。对于掺锆石英光纤, 纤芯和包层的弹光系数分别为  $p_{11}=0.113$ ,  $p_{12}=0.252$ , 泊松比为  $\mu=0.16$ , 可得有效弹光系数  $p_e \approx 0.22$ ; 当  $\lambda_B=1550$  nm 时, 进一步可得 FBG 的应变灵敏度  $K_e=1.21$  pm $\cdot\mu\epsilon^{-1}$ 。

### 2.2 FBG 温度应变串扰问题

由(1)式可知, FBG 的布拉格波长  $\lambda_B$  偏移和光栅周期  $\Lambda$  和有效折射率  $n_{\text{eff}}$  的变化有关。当温度发生变化时, 热膨胀效应和热光效应会使得  $\lambda_B$  变化; FBG 产生的轴向应变会通过改变光栅周期  $\Lambda$  和弹光效应造成  $\lambda_B$  变化。结合(2)式和(3)式可得, 由温度和应变共同作用引起的 FBG 布拉格波长变化可表示为

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B [(\alpha + \xi)\Delta T + (1 - p_e)\epsilon_x] = K_T \Delta T + K_\epsilon \epsilon_x \quad (4)$$

因此当  $\Delta\lambda_B$  变化时, 无法确定是温度还是应变引起的, 这就造成了 FBG 在传感测量中的串扰问题。采用两个温度和应变系数不完全相同的 FBG, 测定两个  $\Delta\lambda_B$ , 并联立方程就可以解出温度  $\Delta T$  和应变  $\epsilon_x$ , 从而解决 FBG 传感测量中温度和应变交叉串扰问题。

## 3 实验和结果讨论

### 3.1 异质 FBG 刻写

实验中样品为普通单模石英光纤(SMF-28, 康宁公司, 美国)、掺镱光纤(SM-YSF-HI, Nufern)和铒镱共掺光纤(SM-EYDF, Nufern)。实验中首先

使用光纤熔接机将两种异质光纤熔接在一起, 利用飞秒激光结合相位掩模板在熔接点的两端分别刻写 FBG。实验中采用的飞秒激光中心波长为 800 nm, 脉冲宽度为 50 fs, 重复频率为 1 kHz。飞秒激光经过柱透镜聚焦后垂直入射到相位掩模板形成衍射。柱透镜焦距为 25 mm, 相位掩模板的周期为 2.142  $\mu\text{m}$ 。实验中使用的相位掩模板针对 800 nm 激光设计, 0 级衍射光能量被抑制(低于 3%),  $\pm 1$  级衍射光各占 35% 左右的能量。 $\pm 1$  级衍射光在重叠区域形成干涉条纹, 诱导光纤纤芯折射率周期性调制形成光栅结构, 光栅周期为相位掩模板周期的一半。刻写光栅的过程中使用光谱分析仪(AQ6370D)监测 FBG 的反射光谱变化。

飞秒激光结合相位掩模板刻写异质 FBG 反射光谱图如图 1 所示。实验中分别将掺镱光纤和铒镱共掺光纤与石英光纤进行熔接加工, 飞秒激光功率为 500 mW, 所制备的 FBG 反射光谱分别如图 1(a) 和图 1(b) 所示。从图中可以看出, 两种异质光纤上刻写的 FBG 均出现两个布拉格共振峰。在掺镱光纤和普通石英光纤熔接点两端刻写的 FBG 的中心波长分别为 1548.732 nm 和 1549.852 nm, 在铒镱共掺光纤和普通石英光纤熔接点两端刻写的 FBG 中心波长分别为 1554.124 nm 和 1550.18 nm。这是由于在不同光纤中刻写的 FBG 虽然光栅周期相同, 但三种光纤具有不同的有效折射率, 所以会有不同的布拉格波长, 两个普通石英 FBG 布拉格波长有微小的差异是加工过程中施加的应变不同造成的。

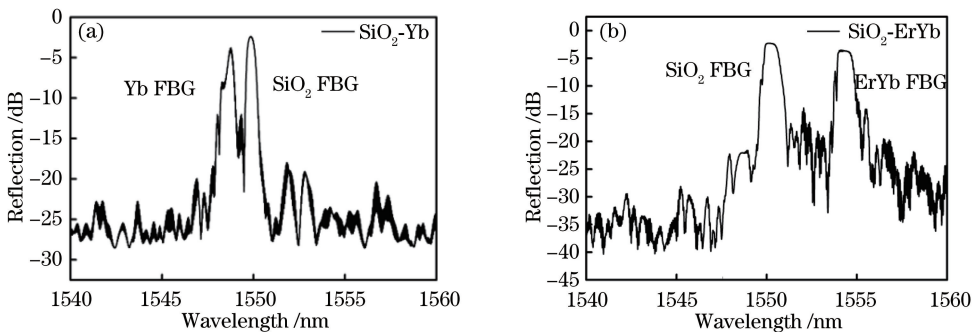


图 1 飞秒激光结合相位掩模板刻写异质 FBG 反射光谱图。(a)掺镱-石英;(b)铒镱共掺-石英  
Fig. 1 Reflective spectra of heterogeneous FBGs fabricated by a femtosecond laser and a phase mask.

(a)  $\text{Yb}^{3+}$  doped fiber and SMF-28; (b)  $\text{Er}^{3+}$ - $\text{Yb}^{3+}$  doped fiber and SMF-28

### 3.2 异质 FBG 温度、应变传感特性

异质 FBG 温度应变测量实验装置如图 2 所示。实验中将塑料烧杯两侧钻出两个微孔(小孔直径略大过光纤直径)。将待标定的 FBG 从烧杯中穿过后, 两端分别用胶水粘接固定在位移平台上, 其中一个

为微位移平台(Thorlabs MBT610D/M, 位移精度为 1  $\mu\text{m}$ , 位移范围为 200  $\mu\text{m}$ ), 受限于烧杯和水浴锅尺寸, FBG 两端固定点距离为 28 cm, FBG 应变范围为 700  $\mu\epsilon$ 。往烧杯中注入水, 水面高于光纤, 保证 FBG 浸没在烧杯内的水中, 然后将烧杯置于水浴

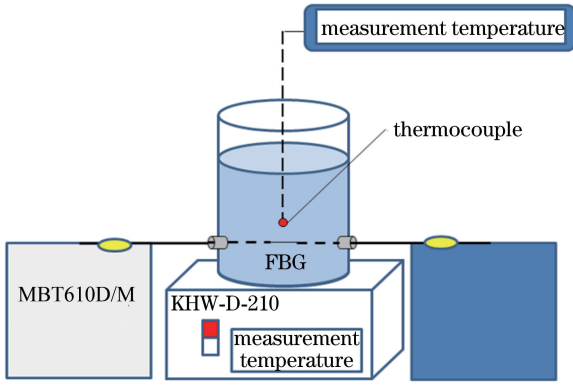


图 2 异质 FBG 温度应变测量实验装置

Fig. 2 Temperature and strain measurement device using heterogeneous fiber FBGs

锅(型号: KHW-D-210)中。因烧杯两侧小孔直径(小于0.5 mm)很小且有光纤从小孔穿过,所以实验过程中只有少量水从小孔渗出,能保证实验从开始到结束(3~5 h)烧杯内的水平面下降不超过

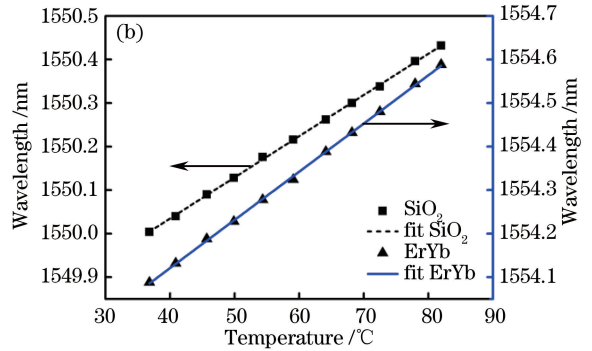
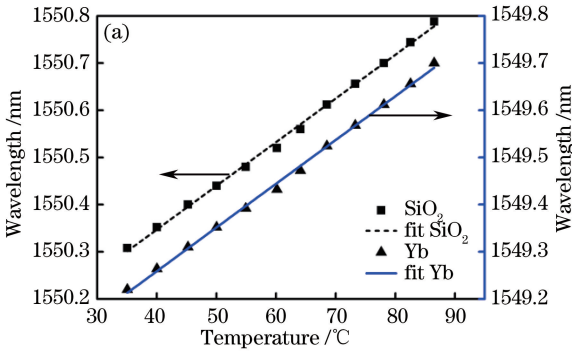


图 3 (a)掺镱-石英 FBG 布拉格波长  $\lambda_B$ -温度曲线;(b)铒镱共掺-石英 FBG 的布拉格波长  $\lambda_B$ -温度曲线  
Fig. 3 (a) Bragg wavelength  $\lambda_B$  versus temperature of FBGs based on Yb<sup>3+</sup> doped fiber and SMF-28;  
(b) Bragg wavelength  $\lambda_B$  versus temperature of FBGs based on Er<sup>3+</sup>-Yb<sup>3+</sup> doped fiber and SMF-28

温度保持为 45 °C 不变,研究 FBG 的应变响应特性。实验中,通过调节微位移平台改变 FBG 的应变,测量相应应变下的 FBG 的反射光谱。实验中应变变化范围为 0~700  $\mu\epsilon$ ,测得掺镱-石英 FBG 和铒镱共掺-石英 FBG 的布拉格波长  $\lambda_B$ -应变曲线分别如图 4(a)和 4(b)所示。实际应用中异质 FBG 应变范围可能受限于异质 FBG 的材料和熔接点的熔接强度。可以看出异质 FBG 中两个 FBG 布拉格波长均随着温度的增加而线性增大。通过对实验数据进行线性拟合,掺镱-石英 FBG 中掺镱 FBG 和石英 FBG 应变响应系数都为 1.40  $\text{pm}\cdot\mu\epsilon^{-1}$ ,铒镱共掺-石英 FBG 中铒镱共掺 FBG 和石英 FBG 应变响应系数分别为 1.43  $\text{pm}\cdot\mu\epsilon^{-1}$  和 1.41  $\text{pm}\cdot\mu\epsilon^{-1}$ 。

两类异质 FBG 中所得到的不同材料光纤的温度和应变响应系数如表 1 所示。可以看出,在石英

1 cm(实验开始时,FBG 距水平面约 6 cm)。水浴锅温度控制范围为室温 + 5 °C 至液体的沸点,温度波动度小于等于  $\pm 1$  °C。测量光栅的温度和应变灵敏度时,先保持温度或者应变不改变,测量应变或者温度对 FBG 布拉格波长的影响。

首先在固定应变 80  $\mu\epsilon$  下,测量 FBG 布拉格波长的温度响应特性。实验中利用水浴锅控制温度在 31~85 °C 改变,每个温度保持 30 min,然后测量相应温度下的 FBG 的反射光谱。测得掺镱-石英 FBG 和铒镱共掺-石英 FBG 的布拉格波长  $\lambda_B$ -温度曲线分别如图 3(a)和 3(b)所示。可以看出异质 FBG 中两个布拉格波长  $\lambda_B$  均随着温度增加线性增大。掺镱-石英异质 FBG 中掺镱 FBG 和石英 FBG 的温度响应系数分别为 9.27  $\text{pm}\cdot\text{°C}^{-1}$  和 9.26  $\text{pm}\cdot\text{°C}^{-1}$ ,铒镱共掺-石英 FBG 中铒镱共掺 FBG 和石英 FBG 温度响应系数分别为 11.07  $\text{pm}\cdot\text{°C}^{-1}$  和 9.46  $\text{pm}\cdot\text{°C}^{-1}$ 。

光纤和不同掺杂光纤中刻写的 FBG 应变系数基本相同(1.40~1.43  $\text{pm}\cdot\mu\epsilon^{-1}$ )。掺镱 FBG 和石英 FBG 温度系数相差不大,均在 9.26~9.46  $\text{pm}\cdot\text{°C}^{-1}$  之间;而铒镱共掺 FBG 温度系数为 11.07  $\text{pm}\cdot\text{°C}^{-1}$ ,明显大于掺镱 FBG 和石英 FBG。因此,利用具有较大温度响应系数差异的铒镱共掺和石英光纤熔接后刻写的异质 FBG 更适合用于温度、应变双参量测量。掺镱光纤虽然和石英 FBG 波长不同,但温度和应变响应系数差别较小,无法用于双解调。

由(4)式可进一步得到异质 FBG 的布拉格波长偏移量与温度应变之间的函数关系为

$$\Delta\lambda_{B1} = K_{T1}\Delta T + K_{\epsilon1}\epsilon_x, \quad (5)$$

$$\Delta\lambda_{B2} = K_{T2}\Delta T + K_{\epsilon2}\epsilon_x, \quad (6)$$

式中: $K_{T1}$  和  $K_{\epsilon1}$  分别为铒镱共掺 FBG 的温度、应变响应系数,需在传感测量之前进行标定; $K_{T2}$  和  $K_{\epsilon2}$

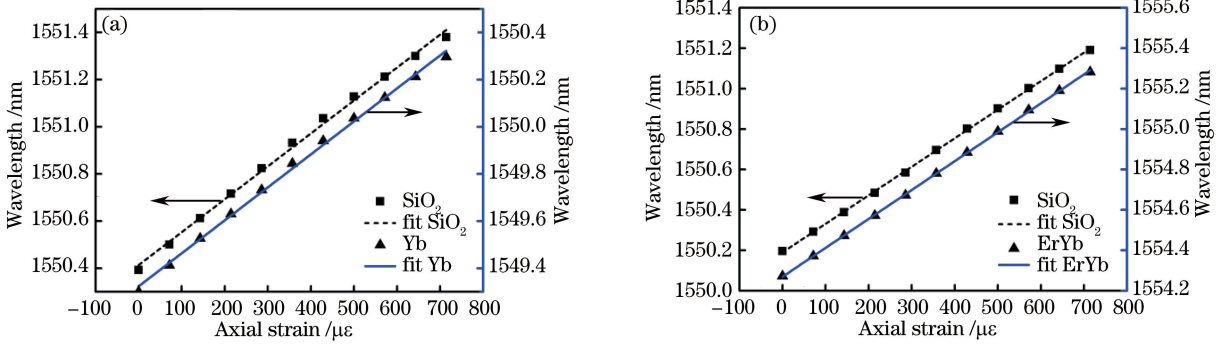


图 4 (a)掺镱-石英 FBG 布拉格波长  $\lambda_B$ -应变曲线;(b)铒镱共掺-石英 FBG 的布拉格波长  $\lambda_B$ -应变曲线

Fig. 4 (a) Bragg wavelength  $\lambda_B$  versus strain of FBGs based on Yb<sup>3+</sup> doped fiber and SMF-28;

(b) Bragg wavelength  $\lambda_B$  versus strain of FBGs based on Er<sup>3+</sup>-Yb<sup>3+</sup> doped fiber and SMF-28

为石英 FBG 的温度、应变响应系数。解调时,通过测得铒镱共掺 FBG 和石英 FBG 的布拉格波长偏移量,再由(5)式和(6)式构成的方程组解析可得温度和应变变量。

表 1 两类异质 FBG 的温度和应变响应系数

Table 1 Temperature sensitivity and strain sensitivity of two variety heterogeneous FBGs

FBG	Temperature sensitivity / ( pm·°C <sup>-1</sup> )	Strain sensitivity / ( pm·με <sup>-1</sup> )
SMF-28 fiber FBG	9.26	1.40
Yb <sup>3+</sup> doped fiber FBG	9.27	1.40
SMF-28 fiber FBG	9.46	1.41
Er: Yb doped fiber FBG	11.07	1.43

### 3.3 异质 FBG 耐温特性

将铒镱共掺-石英 FBG 置于管式炉中,在 600 °C 下退火 2 h,再升温至 800 °C 退火 15 min 后,研究异质 FBG 的耐温特性。经过退火过程后,铒镱共掺-石英两部分 FBG 的反射率都有下降。铒镱共掺 FBG 反射率由 -3.528 dB 下降到 -17.33 dB 并稳定,石英 FBG 反射率由 -2.277 dB 下降到 -3.28 dB 并稳定。这可能是因为在退火的过程中,一些高温下不稳定的光栅结构被擦除了。接着将管式炉的温度分别设置为 300,400,500 °C,分别保持 0.5 h,之后再 将管式炉温度分别设置为 600,700,800 °C,分别保持 3 h,并且在温度保持过程中观察铒镱共掺-石英 FBG 反射光谱的变化。不同温度下铒镱共掺-石英 FBG 反射率随保持时间的变化曲线如图 5 所示。

由图 5 可见,经过退火过程后,铒镱共掺-石英 FBG 在 700 °C 高温下两段 FBG 反射率都具有较好的稳定性。在 800 °C 时,石英 FBG 反射率逐渐下降,铒镱共掺 FBG 反射率急剧下降,石英 FBG 的反

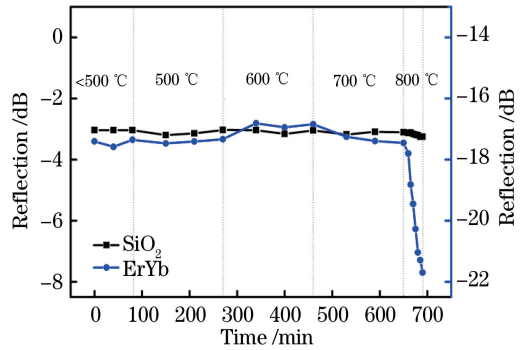


图 5 不同温度下铒镱共掺-石英 FBG 反射率随保持时间的变化曲线

Fig. 5 Reflectivity versus time of Er<sup>3+</sup>-Yb<sup>3+</sup> doped fiber and SMF-28 in different temperatures

射率退化速度相对于铒镱共掺较慢,这主要是由于刻写的石英 FBG 具有更高的折射率调制度。以上结果表明,铒镱共掺-石英异质 FBG 可以在 700 °C (或 700 °C 以下)稳定工作。通过进一步优化加工条件,在异质光纤中制备出 Type II 型 FBG,有望能使异质 FBG 的耐温特性提升到 1000 °C。

## 4 结 论

将掺杂光纤和普通单模石英光纤熔接在一起,并利用高峰值功率的飞秒激光结合相位掩模板法在熔接点处制备了光栅形成异质 FBG;测量了掺镱-石英 FBG 和铒镱共掺-石英 FBG 两类异质 FBG 的温度、应变响应系数测量。结果证明:掺镱-石英 FBG 对温度和应变的响应系数相差不大,但铒镱共掺-石英 FBG 的温度响应系数差异较大。温度响应系数差异较大,应变响应系数相近表明铒镱共掺-石英 FBG 可应用于温度、应变双参数传感测量。铒镱共掺-石英 FBG 的耐温特性表明该异质 FBG 可以在 700 °C (或 700 °C 以下)稳定工作。

## 参 考 文 献

- [1] He S L, Hao F H, Liu P F, *et al.* High precision fiber Bragg grating pressure sensor with real-time temperature compensation [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(6): 0605003.  
何少灵, 郝凤欢, 刘鹏飞, 等. 温度实时补偿的高精度光纤光栅压力传感器[J]. 中国激光, 2015, 42(6): 0605003.
- [2] Liu X. On the application of fiber optical sensor to geomechanics and geotechnical engineering [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(5): 588-591.
- [3] Zhang Y G, Xiang S Q, He H, *et al.* Study on high temperature optic fiber grating sensor [J]. Chinese Journal of Lasers, 2005, 32(9): 1235-1238.  
詹亚歌, 向世清, 何红, 等. 光纤光栅高温传感器的研究[J]. 中国激光, 2005, 32(9): 1235-1238.
- [4] Tennyson R C, Coroy T, Duck G, *et al.* Fibre optic sensors in civil engineering structures [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2000, 27(5): 880-889.
- [5] Yang X F, Zhang C Y, Tong Z R, *et al.* Experimental research of temperature sensing properties of a novel fiber grating [J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(4): 0405005.  
杨秀峰, 张春雨, 童峥嵘, 等. 一种新型光纤光栅温度传感特性的实验研究[J]. 中国激光, 2011, 38(4): 0405005.
- [6] Zhou C X, Zeng Q K, Qin Z X, *et al.* Principle and progress of fiber grating strain-temperature sensors [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2006, 43(10): 53-58.  
周春新, 曾庆科, 秦子雄, 等. 光纤光栅应变-温度传感器的原理及进展[J]. 激光与光电子学进展, 2006, 43(10): 53-58.
- [7] Zha K D, Wang X Y. Optical fiber Bragg grating manufacturing and application [J]. Journal of Applied Optics, 1996, 17(6): 17-26.  
查开德, 王向阳. 光纤布喇格光栅的制作和应用[J]. 应用光学, 1996, 17(6): 17-26.
- [8] Bi W H, Li W, Fu G W. Simultaneous measurement of strain and temperature with a fiber Bragg grating sensor array [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2003, 14(8): 827-834.  
毕卫红, 李卫, 傅广为. 分布式光纤光栅实现应变和温度的同时测量[J]. 光电子 • 激光, 2003, 14(8): 827-834.
- [9] Wang Y H, Zhang M Y, Zhang C W, *et al.* Strain sensing measurement technology for fiber Bragg grating with holder type temperature self-compensation [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(5): 0506005.  
王永洪, 张明义, 张春巍, 等. 夹持式温度自补偿光纤光栅应变传感测试技术[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(5): 0506005.
- [10] Zhou G P. Study of FBG strain-temperature separation technology [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2011, 33(5): 706-708.  
周国鹏. 光纤光栅传感器温度-应变分离技术的研究[J]. 压电与声光, 2011, 33(5): 706-708.
- [11] Liu F C, Feng J L, Wang Y, *et al.* Sensitivity to temperature and strain of bridge structure of FBG sensor [J]. Optical Instruments, 2017, 39(1): 26-30.  
刘凤超, 冯进良, 王洋. 基于桥梁结构的FBG传感器温度与应变交叉敏感问题的研究[J]. 光学仪器, 2017, 39(1): 26-30.
- [12] Du W C, Tao X M, Tam H Y. Fiber Bragg grating cavity sensor for simultaneous measurement of strain and temperature [J]. Photonics Technology Letters, 1999, 11(1): 105-107.
- [13] Xu M G, Archambault J L, Reekie L, *et al.* Discrimination between strain and temperature effects using dual wavelength fiber grating sensors [J]. Electronics Letters, 1994, 30(13): 1085-1087.
- [14] Kersey A D, Berkoff T A, Morey W W. Fiber-optic Bragg grating strain sensor with drift-compensated high-resolution interferometric wavelength-shift detection [J]. Optics Letters, 1993, 18(1): 72-74.
- [15] Kanellopoulos S E, Handerek V A, Rogers A J. Simultaneous strain and temperature sensing with photogenerated in-fiber gratings [J]. Optics Letters, 1995, 20(3): 333-335.
- [16] Patrick H J, Williams G M, Kersey A D, *et al.* Hybrid fiber Bragg grating/long period fiber grating sensor for strain/temperature discrimination [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1996, 8(9): 1223-1225.
- [17] Zhao H X, Cheng P H, Bao J L, *et al.* Strain and temperature simultaneous measurement using a two-section FBG [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2014, 25(6): 1071-1074.  
赵洪霞, 程培红, 鲍吉龙, 等. 一种两段式FBG应变和温度同步测量的实现[J]. 光电子 • 激光, 2014, 25(6): 1071-1074.
- [18] Guan B O, Tam H Y, Ho S L, *et al.* Study on strain/temperature two parameters sensing with a single fiber Bragg grating [J]. Chinese Journal of Lasers, 2001, 28(4): 372-374.  
关柏鸥, Tam H Y, Ho S L, 等. 单光纤光栅温度应变双参数传感研究[J]. 中国激光, 2001, 28(4): 372-374.

- [19] Kersey A D, Berkoff T A, Morey W W. Fiber-optic Bragg grating strain sensor with drift-compensated high-resolution interferometric wavelength-shift detection[J]. *Optics Letters*, 1993, 18(1): 72-74.
- [20] Smelser C W, Mihailov S J, Grobnc D. Formation of Type I-IR and Type II-IR gratings with an ultrafast IR laser and a phase mask [J]. *Optics Express*, 2005, 13(14): 5377-5386.
- [21] Du Y, Si J H, Chen T, *et al.* Quasi-distributed high temperature sensor based on fiber Bragg grating [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(10): 100606.  
杜勇, 司金海, 陈涛, 等. 准分布式光纤布拉格光栅高温传感器 [J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(10): 100606.
- [22] Zhang Z J. Theoretical basis and sensing technology of fiber Bragg gratings [M]. Beijing: Science Press, 2009: 118.  
张自嘉. 光纤光栅理论基础与传感技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2009: 118.
- [23] Ding P, Dong X P, Ye X W. Research on measurement of fiber Bragg grating considering the cross-sensitivity of temperature and strain [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(2): 020605.  
丁朋, 董小鹏, 叶肖伟. 考虑温度和应变交叉敏感的光纤布拉格光栅测量研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(2): 020605.