

# 应用低温等离子体技术的多环减敏型 FBG 应变传感器

徐潇宇, 朱星盈, 肖少庆

江南大学物联网工程学院, 江苏 无锡 214000

**摘要** 为了满足对船舶、桥梁、飞行器等的关键结构进行较大应变范围测量的需要,设计了一种应用低温等离子体技术的多环减敏型光纤布拉格光栅(FBG)应变传感器。对长为 30 mm 的三环减敏应变基片进行有限元分析,在传感器结构左右端面上各施加 0.083 mm 的位移,经计算可得,栅区的应变约为 1700  $\mu\epsilon$ ,结构的减敏系数为 2.91。在实验中设置两组传感器进行对照实验,采用低温等离子体技术对其中一组传感器的栅区表面进行扫描处理,另外一组栅区不做处理,验证两组传感器在 +5000  $\mu\epsilon$  以内的传感特性。实验结果表明,等离子体放电扫描处理次数越多,光纤光功率越大。系统平均测量误差约 50  $\mu\epsilon$ ,满量程精度小于 0.5%,解决了由于封装过程中栅区端面污染导致的系统标定结果不稳定、线性度差等问题。

**关键词** 光纤光学; 光纤布拉格光栅; 低温等离子体技术; 有限元分析; 多环减敏结构

中图分类号 TN29

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.070602

## Multi-Loop Desensitization Fiber Bragg Grating Strain Sensors Using Low Temperature Plasma Technology

Xu Xiaoyu, Zhu Xingying, Xiao Shaoqing

School of Internet of Things Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214000, China

**Abstract** In order to meet the need of large strain range measurement on the key structures of ship, bridge, aircraft, and so on, we design a multi-loop desensitized fiber Bragg grating (FBG) strain sensor based on low temperature plasma. Finite element analysis of a tricyclic desensitized strain gauge substrate with a length of 30 mm is carried out with a displacement of 0.083 mm on each of the left and right end faces. After calculation, the strain in the gate region is about 1700  $\mu\epsilon$  and the desensitization coefficient of the structure is 2.91. Two contrast groups are adopted to verify the sensing characteristics within +5000  $\mu\epsilon$ ; low temperature plasma is used to treat the gate region surface for one group sensor; while the other is set as default. The results show that the more times the plasma discharge treats the gate region surface, the larger the fiber optical power becomes. The average measurement error of the system is about 50  $\mu\epsilon$ , and the full-scale accuracy is less than 0.5%, which solves the problems of instability and poor linearity of the system calibration results caused by the pollution of the gate end face during the packaging process.

**Key words** fiber optics; fiber Bragg grating; low temperature plasma technology; finite element analysis; multi-loop desensitization structure

**OCIS codes** 060.3735; 060.2270; 060.3738; 060.2370

收稿日期: 2017-12-04; 收到修改稿日期: 2017-12-27

基金项目: 国家自然科学基金(31471251,614040161)

作者简介: 徐潇宇(1993—),男,硕士研究生,主要从事低温等离子体应用方面的研究。E-mail: 1398243989@qq.com

导师简介: 肖少庆(1980—),男,博士,硕士生导师,主要从事低温等离子体技术以及新型半导体材料与器件方面的研究。

E-mail: larring0078@hotmail.com(通信联系人)

# 1 引言

光纤光栅传感器作为发展最快的无源器件之一,已经凭借其高精度、现场不供电、不受电磁干扰、使用寿命长等优点,开始应用于如应变点定位、光纤超声传感、倾角测量等智能监测领域<sup>[1-3]</sup>。应力监测一般都是应用在结构比较复杂、应变范围较大、对系统稳定性要求比较高的领域,而加大量程、增加系统稳定性、简化封装工艺是应变传感器研究中首先需要解决的问题<sup>[4-5]</sup>。但是普通光纤承受的最大应变约为  $3000 \mu\epsilon$ ,因此需要对传感器进行减敏设计。2015年陈昊等<sup>[6]</sup>设计了一种基片式光纤光栅应变传感器,其灵敏系数为  $1.05 \text{ pm}/\mu\epsilon$ ,线性度约为 0.99。2017年覃荷瑛等<sup>[7]</sup>提出了一种螺旋倾斜复合结构的光纤布拉格光栅应变传感器,在结构上巧妙地对光纤的应变进行减敏。虽然以上两种应变传感器可以实现大量程测量,但他们结构相对复杂,线性度与精度也有待提高。

目前最常用的光纤光栅写入方法是紫外写入法<sup>[8]</sup>,这种方法对光纤本身的光敏性有较高的要求,通常要采用载氢增敏技术对光纤进行增敏<sup>[9]</sup>。当载氢光纤受到紫外线照射之后,光纤中的 H 分子与 Si、Ge 原子会发生化学反应,从而形成 Si—OH、Ge—OH 等化学键与缺陷中心<sup>[10]</sup>,这一现象改变了纤芯的折射率,刻写完成后光纤中未发生反应的 Si—OH 键、Ge—OH 键会影响光纤光栅传感特性<sup>[11]</sup>,因此需要对制备完成后的裸纤进行退火处理,以增强传感器的测量性能。等离子体<sup>[12]</sup>是气体受外界高能作用发生电离产生的物质,因为其电荷数相等而呈现出电中性,其体系中高能电子与各种激发态的离子活性都很高,具有低温、快速、杀菌、零破坏性等优点<sup>[13]</sup>。利用这种技术处理光纤栅区

可以实现栅区的快速退火,解决了栅区端面杂质污染与折射率不均匀等问题。

基于此,本文设计了一种基于低温等离子体技术的新型三环减敏式光纤布拉格光栅(FBG)应变传感器,介绍了结构的传感原理,对结构进行了有限元分析。并通过对比实验对传感器设计的可行性、线性度与系统的稳定性进行验证。

## 2 传感原理与结构分析

### 2.1 传感原理

多环应变结构示意图如图 1 所示,复合结构中各部分的载荷近似相等。假设结构受到的力为  $F$ ,多环减敏结构的总长度为  $L$ ,总长度变化量为  $\Delta L$ ,总应变为  $\epsilon$ ,材料弹性模量为  $E$ ,两端平板结构的长度为  $L_1$ ,刚度为  $K_1$ ,截面积为  $A_1$ ,宽度为  $d$ ,应变为  $\epsilon_1$ ,受力后长度变化量为  $\Delta L_1$ ,两端圆弧长度为  $L_2$ ,刚度为  $K_2$ ,应变为  $\epsilon_2$ ,长度变化量为  $\Delta L_2$ ,中间圆弧长度为  $L_3$ ,刚度为  $K_3$ ,应变为  $\epsilon_3$ ,长度变化量为  $\Delta L_3$ ,传感光栅的应变为  $\epsilon_{\text{FBG}}$ 。假设光纤光栅与材料之间的应变为刚性传递,各结构的应变都近似于光纤的应变,根据静力学模型<sup>[14]</sup>有关系式为

$$F = K_1 \Delta L_1, \quad (1)$$

$$K_i \Delta L_i = A_1 E \epsilon_{\text{FBG}}, \quad i = 2, 3. \quad (2)$$

由(1)式、(2)式可以推出:

$$\Delta L_i = \frac{A_1 E \epsilon_{\text{FBG}}}{K_i}, \quad i = 2, 3, \quad (3)$$

$$\Delta L = \left( 2L_1 + \frac{2A_1 E}{K_2} + \frac{A_1 E}{K_3} \right) \epsilon_{\text{FBG}}, \quad (4)$$

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L}. \quad (5)$$

将(4)式代入(5)式得

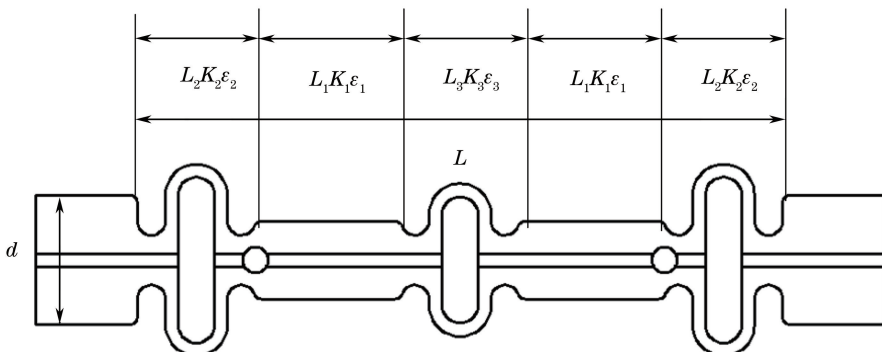


图 1 多环应变结构示意图

Fig. 1 Schematic of multi-loop strain structure

$$\epsilon = \left( \frac{2L_1}{L} + \frac{2A_1E}{K_2L} + \frac{A_1E}{K_3L} \right) \epsilon_{\text{FBG}} \quad (6)$$

环形弹簧结构刚度为<sup>[14]</sup>

$$K_i = \frac{2EI_i}{\pi r^3}, i = 2, 3, \quad (7)$$

式中:  $I_2$  为两端环形弹簧结构的极惯性矩;  $I_3$  为中间环形弹簧结构的极惯性矩;  $r$  为环形的半径。由(6)式和(7)式可得

$$\epsilon = \left( \frac{2L_1}{L} + \frac{\pi r^3 A_1}{I_2 L} + \frac{\pi r^3 A_1}{2I_3 L} \right) \epsilon_{\text{FBG}} \quad (8)$$

对于一个结构确定的传感器,  $L_1$ 、 $L$ 、 $A_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$ 、 $r$  为常数, (8)式表明结构的总应变  $\epsilon$  与光栅的应变  $\epsilon_{\text{FBG}}$  有严格的线性关系。在不考虑温度对光栅的作用下, 光栅的中心波长变化量与光栅的应变具有线性关系, 即<sup>[14]</sup>

$$\Delta\lambda = K_\epsilon \epsilon_{\text{FBG}}, \quad (9)$$

式中:  $\Delta\lambda$ 、 $K_\epsilon$  分别为光栅中心波长漂移量和应变传感系数。由(9)式可以看出, 复合结构的总应变与中心波长的变化量呈线性关系。

## 2.2 有限元仿真

设计时在长度为 30 mm 的基片上表面预开半径为 0.25 mm 贯穿两端面的长槽, 用来固定与安装光纤光栅。封装好后在槽内滴加少量硅胶对光纤光栅进行保护, 既方便进行低温等离子体处理, 又不影响光纤光栅的轴向拉伸变形。仿真时选择 TC4 材料作为基板材料, 这种材料的优势在于不但弹性模量较小而且机械加工性能好。在划分网

格时, 为了提高计算精度, 设置单元尺寸为 0.2 mm, 以保证在厚度方向有大于 3 层的网格。同时对网格的纵横比、对边平度、翘曲系数等参数进行检查。仿真时结构最大承受负载设为  $\pm 5000 \mu\epsilon$ , 由于这种应变转化到水平轴向位移的加载值约为 0.166 mm, 所以仿真时在结构左右端面上各施加  $\pm 0.083$  mm 的位移量。

仿真的拉伸结果如图 2 所示, 应变减敏结构的形变基本被三个环形减敏结构吸收, 其中两端的大环起到绝对减敏的作用, 小环的变形又能确保传感器测量具有较高的灵敏度。结构的减敏比定义为在受到载荷后被测结构本身的应变值与布拉格栅区应变值的比值, 而栅区在基片中心上固定区间的长度为 16 mm, 软件检测到固定点处位移量为 0.01373 mm, 则可计算出栅区的应变值约为  $1700 \mu\epsilon$ , 结构的减敏比约为 2.91。

仿真的压缩结果如图 3 所示, 由图中可知结构的最大等效拉伸强度约为 642.07 MPa, 其位置在圆环内侧及过渡圆环的弧底。最大拉伸强度没有超过材料的屈服极限 860 MPa, 并且留有 1.34 左右的安全系数, 减敏比与拉伸结果相同, 综上所述该结构满足设计要求。

## 3 实验结果及分析

低温等离子体扫描处理示意图如图 4 所示, 在实验中对两组初始波长 (1553 nm) 与初始光功率 ( $-25$  dBm) 相同的传感器进行封装。利用长为

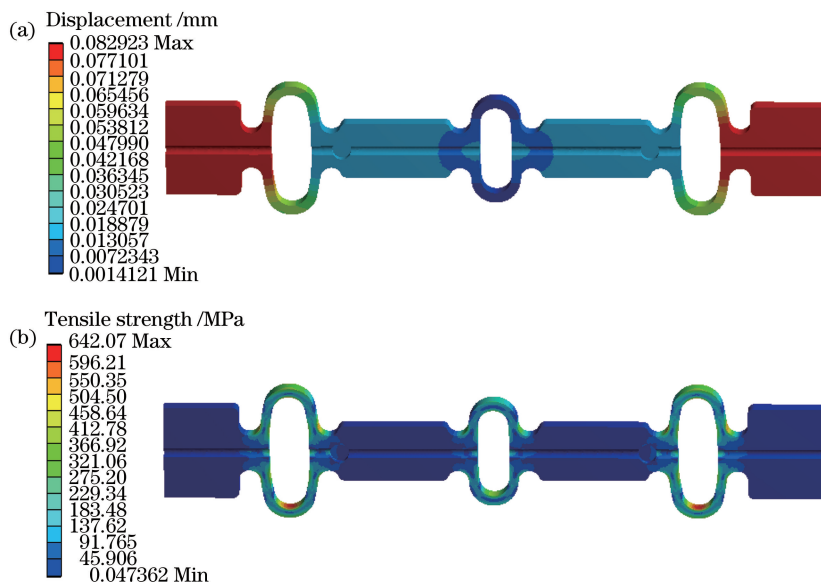


图 2 拉伸结果图。(a)拉伸位移云图;(b)拉伸强度云图

Fig. 2 Drawing of tensile results. (a) Tensile displacement nephogram; (b) tensile strength nephogram

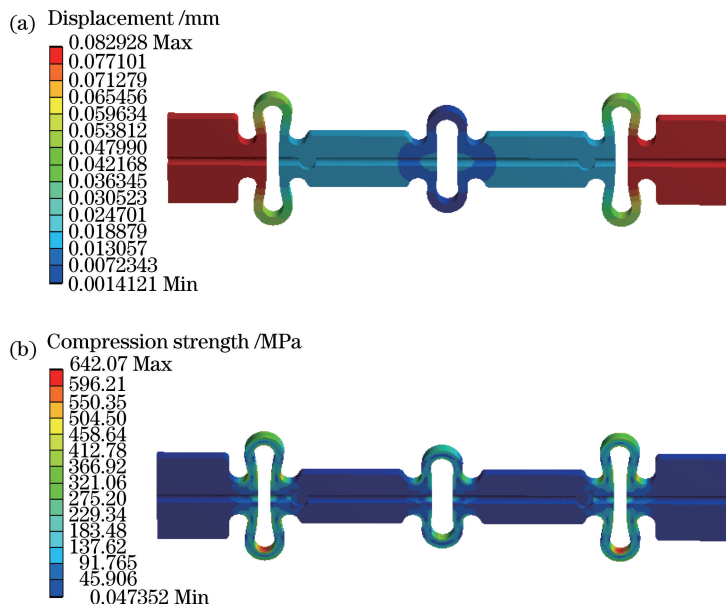


图 3 压缩结果图。(a)压缩位移云图;(b)压缩强度云图

Fig. 3 Drawing of compression results. (a) Compression displacement nephogram;  
(b) compression strength nephogram

1.5 cm 的低温等离子体射流扫描处理第一组传感器的栅区端面,每次扫描时间为 10 s,每次扫描之后调取 BFT510-12 微型化光纤传感分析仪中的光谱图。第二组传感器中的 FBG 未经处理。

第一组传感器扫描之后的光谱图如图 5 所示,第 10 次扫描之后 FBG 的光功率约为  $-21$  dBm,第 2 次扫描之后 FBG 的光功率约为  $-24$  dBm,实验对比发现经过低温等离子体处理之后的光纤光栅光功

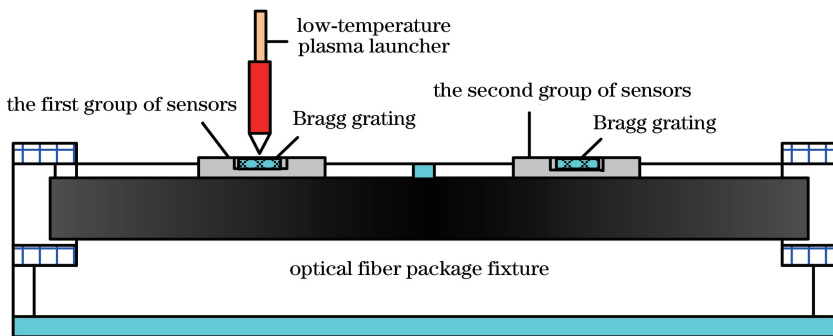


图 4 等离子体扫描处理示意图

Fig. 4 Plasma scanning process schematic

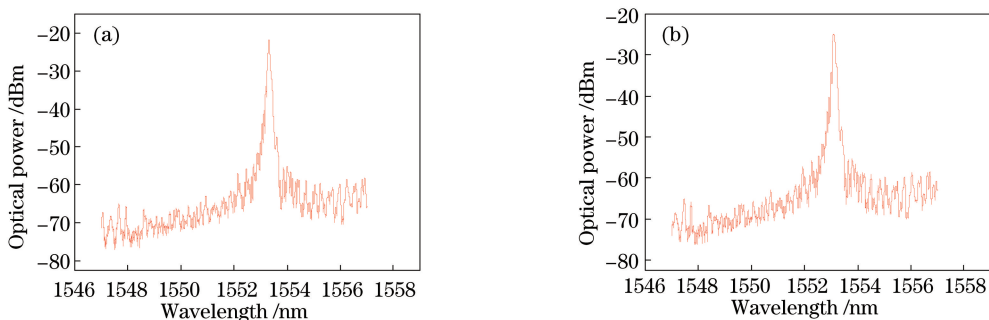


图 5 第一组 FBG 光谱图。(a)第 10 次扫描;(b)第 2 次扫描

Fig. 5 FBG spectra of the first group. (a) 10<sup>th</sup> scanning; (b) 2<sup>nd</sup> scanning

率会有所提高。为了证明经过低温等离子体技术处理的传感器的传感性能,将封装后的上述两组传感器焊接在拉伸板上,使用万能拉伸机进行拉伸实验,验证 $+5000 \mu\epsilon$ 以内的传感性能。

实验装置示意图如图 6 所示,实验中万能拉伸机通过控制拉伸板运动来改变传感器的应变,设无

线应变测量片的测量结果为实际应变值,两组传感器中的波长数据由采集箱中的光纤传感分析仪传送到数据控制柜中,数据控制柜中的计算机再利用 Origin 对采集箱中测量的波长值与应变片测量的应变值进行线性分析得到波长与应变的函数关系式,标定出应变与波长的关系系数。

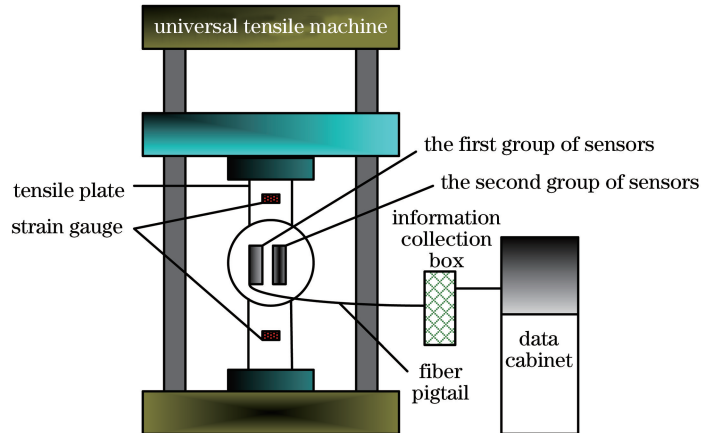


图 6 实验装置示意图

Fig. 6 Schematic of experimental device

两组传感器实验拟合结果如图 7 所示,从图 7 (a)中可以看出,经过拉伸实验之后第一组传感器测量值与应变片测量的值在图中几乎重合,传感器拟合的线性度达到 0.999 以上。而从图 7(b)中可以看出,第二组传感器测量值与应变片测量值存在一定的偏差,拟合线性度约为 0.998,相比第一组的线性度差 0.001。通过图 7(c)可知第一组传感器在

$5000 \mu\epsilon$ 拉伸范围内的平均残差值小于  $50 \mu\epsilon$ ,则对于量程为  $10000 \mu\epsilon (\pm 5000 \mu\epsilon)$  的传感器的满量程精度约为 0.5%,系统稳定性好。而从图 7(d)中可知第二组传感器在  $5000 \mu\epsilon$  拉伸范围内的平均残差约  $100 \mu\epsilon$ ,相比第一组测量的残差值的波动较大,所对应的测量精度也相对较差。

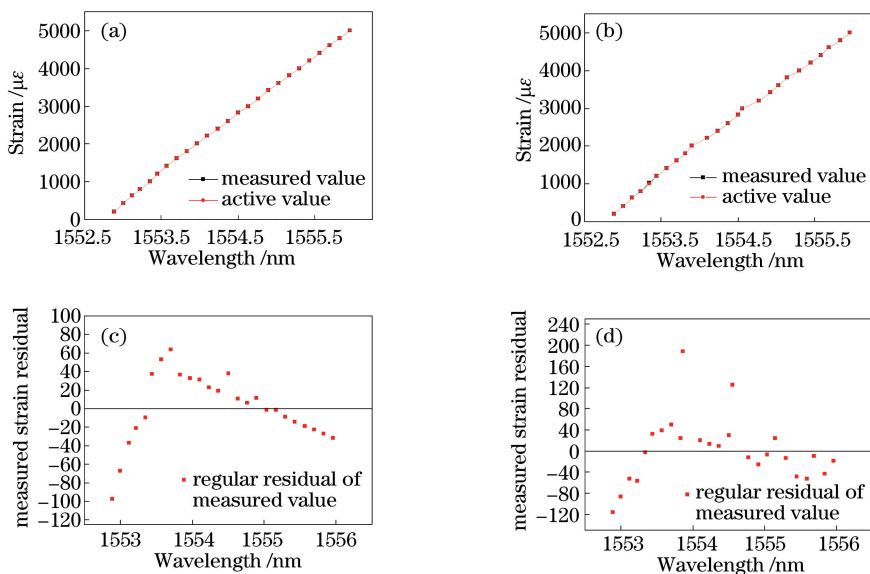


图 7 拟合结果。(a)第一组拟合关系;(b)第二组拟合关系;(c)第一组测量应变残差;(d)第二组测量应变残差

Fig. 7 Fitting results. (a) First group fitting relationship; (b) second group fitting relationship;

(c) first group measured strain residual; (d) second group measured strain residual

## 4 结 论

研制了一种应用低温等离子体技术的多环减敏型FBG应变传感器。通过仿真与实验可知,传感器测量的线性度与可靠性极高,FBG作为传感单元固定在平板结构的中间使得环形弹簧结构承担整个结构的大部分应变,达到对光栅和平板结构进行减敏的目的,实现了大量程的应变测量。经过低温等离子体扫描之后的光纤光栅的光功率与灵敏性都会有所提升,同时该方法也解决了传统光纤光栅传感器封装过程中端面不良的问题。该传感器的系统误差减小、结构优化、生产成本降低,便于大量生产,可以广泛地应用在结构监测等领域。

### 参 考 文 献

[1] Xie T, Wang X, Li C, *et al.* Fiber Bragg grating differential tilt sensor based on mercury column piston structure[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(3): 0306002.

谢涛, 王行, 李川, 等. 水银柱活塞差动式光纤布拉格光栅倾角传感器[J]. *光学学报*, 2017, 37(3): 0306002.

[2] Li T L, Tan Y G, Han X, *et al.* Diaphragm based fiber Bragg grating acceleration sensor with temperature compensation [J]. *Sensors*, 2017, 17(12): 218.

覃荷瑛, 朱万旭, 张贺丽, 等. 内嵌预压式大量程光纤光栅传感器的智能钢绞线的研制与性能分析[J]. *中国激光*, 2017, 44(4): 0410001.

[3] Qin H Y, Zhu W X, Zhang H L, *et al.* Manufacturing and performance analysis of intelligent steel strand embedded with prepressure large scale fiber Bragg grating sensor [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(4): 0410001.

覃荷瑛, 朱万旭, 张贺丽, 等. 内嵌预压式大量程光纤光栅传感器的智能钢绞线的研制与性能分析[J]. *中国激光*, 2017, 44(4): 0410001.

[4] Zhao Y, Yu C, Liao Y B. Differential FBG sensor for temperature-compensated high-pressure ( or displacement) measurement [J]. *Optics & Laser Technology*, 2004, 36(1): 39-42.

赵浩, 丁浩, 刘斌, 等. 载氢光纤光致折变布拉格光栅[J]. *光学学报*, 1996, 16(4): 575-576.

[5] Quan W W, Kang J, Yang L, *et al.* Young's modulus measurement of metal beams based on fiber Bragg grating[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(4): 040604.

束德林. 工程材料力学性能[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016: 60-200.

2016, 53(4): 040604.

[6] Chen H, Yan G, Zhuang W, *et al.* Research on preload package and sensing characteristics of fiber grating strain sensor[J]. *Laser & Infrared*, 2016, 46(9): 1128-1132.

陈昊, 闫光, 庄炜, 等. 光纤光栅应变传感器预紧封装及传感特性研究[J]. *激光与红外*, 2016, 46(9): 1128-1132.

[7] Qin H Y, Huo T T, Zhu W X. Desensitization effect of helix-slant composite technology on fiber Bragg grating sensor [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(3): 030601.

覃荷瑛, 霍婷婷, 朱万旭. 螺旋倾斜复合技术对光纤布拉格光栅传感器的减敏作用[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(3): 030601.

[8] Xu M G, Reekie L, Chow Y T, *et al.* Optical in-fibre grating high pressure sensor [J]. *Electronics Letters*, 1993, 29(4): 398-399.

[9] Zhao H, Ding H, Liu B, *et al.* Bragg gratings photoimprinted in hydrogen loaded optical fibers[J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, 16(4): 575-576.

赵浩, 丁浩, 刘斌, 等. 载氢光纤光致折变布拉格光栅[J]. *光学学报*, 1996, 16(4): 575-576.

[10] Li K, Xin J T, Xia J B, *et al.* Research of rapid annealing of fiber Bragg gratings based on arc plasma [J]. *Laser technology*, 2017, 41(5): 649-653.

李凯, 辛璟焘, 夏嘉斌, 等. 基于电弧等离子体的光纤光栅快速退火的研究[J]. *激光技术*, 2017, 41(5): 649-653.

[11] Li J Z, Jiang D S. Hydrogen loading and fiber Bragg grating[J]. *Chinese Journal of Materials Research*, 2006, 20(5): 518-522.

[12] Manière C, Pavia A, Durand L, *et al.* Finite-element modeling of the electro-thermal contacts in the spark plasma sintering process[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2016, 36(3): 741-748.

[13] Kim K, Ahn H J, Lee J H, *et al.* Cellular membrane collapse by atmospheric-pressure plasma jet[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(1): 013701.

[14] Shu D L. Mechanical properties of engineering materials[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2016: 60-200.

束德林. 工程材料力学性能[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016: 60-200.