

# FBG 光纤的飞秒激光刻蚀特性及传感应用

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2021.06.005

周 贤<sup>1,2</sup> 刘克非<sup>1,2</sup>  
张 欣<sup>1</sup> 张海波<sup>1,2</sup>  
明兴祖<sup>3</sup>

1. 湖北文理学院  
纯电动汽车动力系统设计与  
测试湖北省重点实验室  
湖北 襄阳 441053
2. 湖北文理学院  
机械工程学院  
湖北 襄阳 441053
3. 湖南工业大学  
机械工程学院  
湖南 株洲 412007

**摘 要:** 在布拉格光栅 (FBG) 光纤的包层中制作微槽, 结合敏感材料提高了 FBG 光纤传感器的灵敏度, 拓宽了其传感应用领域。利用飞秒 (fs) 激光对 I 型布拉格光栅光纤进行刻蚀, 通过调节激光功率和辐照时间, 分析光纤折射率变化以及光纤表面和内部结构的刻蚀特性, 并探讨 fs 激光对光纤光栅微沟槽形貌和反射光谱的影响。实验结果表明, 微槽表面由于碎屑的凝固而产生许多柱状结构, 且随着激光能量的增加, 柱状结构不断长大, 槽深和形状服从高斯能量分布; 随着激光功率和辐照时间的增加, 反射率谱永久红移, 带宽增加。利用微结构光纤增敏性能, 有效提高微结构光纤光栅磁场探头和氢气探头的传感性能。

**关键词:** 飞秒激光; 布拉格光栅光纤; 折射率; 微结构

**中图分类号:** TN24

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1674-7100(2021)06-0034-08

**引文格式:** 周 贤, 刘克非, 张 欣, 等. FBG 光纤的飞秒激光刻蚀特性及传感应用 [J]. 包装学报, 2021, 13(6): 34-41.

## 0 引言

光栅光纤传感器因其具有抗电磁干扰、高分辨率、轻量化、体积小、远距离传输等优良性能<sup>[1]</sup>, 在包装自动化加工系统中被广泛应用。微结构光栅光纤具有比标准光栅光纤更高的伸缩性、较大的表面积, 其灵敏度显著提高。研究人员不断探索在光栅光纤上刻蚀不同的微结构 (如微槽<sup>[2]</sup>, 微腔<sup>[3]</sup>), 再将其制成各种新型传感器, 如在布拉格光栅 (fiber Bragg grating, FBG) 光纤的包层制作微结构, 并结合敏感涂层制成的新型光栅光纤传感器, 其在磁场测量<sup>[4]</sup>、

气体传感<sup>[5]</sup>等领域有着广泛的应用。

超短脉冲激光刻蚀是一种能有效提高微加工效率的技术, 它具有峰值功率高、性能优良等优点, 适合加工各种硬脆材料<sup>[6]</sup>。如采用飞秒 (femtosecond, fs) 激光与相位掩模或逐点刻划技术相结合, 在光纤或熔融二氧化硅中制备各种光栅<sup>[7-9]</sup>。光栅或波导的特性直接受激光能量、辐照时间、聚焦数值孔径等影响, 因此有关飞秒激光与介质材料之间的刻蚀机理研究也越来越多。然而, 透明材料激光损伤的机理并不统一, 如熔融二氧化硅中超快激光诱导折射率的变化原因有应力、致密化、色心、累积加热等理论<sup>[10-12]</sup>。

**收稿日期:** 2021-09-12

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (51975192, 61475121); 湖南省自然科学基金资助项目 (2021JJ30214, 2021JJ50042); “机电汽车”湖北省优势特色学科群开放基金资助项目 (XKQ2021050, XKQ2021044, XKQ2021043); 湖北文理学院科研启动基金资助项目 (2059016)

**作者简介:** 周 贤 (1982-), 男, 江西南昌人, 湖北文理学院讲师, 博士, 主要研究方向为光纤传感与激光微加工技术, E-mail: zhouxian429@126.com

**通信作者:** 明兴祖 (1964-), 男, 湖南临澧人, 湖南工业大学教授, 博士, 硕士生导师, 主要研究方向为激光精微加工理论与技术, E-mail: mxz9036@126.com

一般来说, 低激光能量会导致与色心理论有关的 I 型结构的正折射率变化, 而超过损伤阈值的辐照能量则通常产生与应力、致密化有关的 II 型结构<sup>[13-14]</sup>。

为深入研究激光诱导折射率变化的机理, 本研究利用飞秒激光在光栅光纤包层上制备了直槽微结构, 近似量化了飞秒激光诱导的光栅光纤折射率变化, 研究光纤表面微结构的刻蚀特性。此外, 还研究了不同加工参数对光栅光纤的影响, 退火实验结果在一定程度上验证了激光对光纤损伤的机理, 并以微型结构光栅光纤磁场探头和氢气探头为例进行了实验研究, 以期探究飞秒激光刻蚀微结构的光纤特性以及微结构光纤传感增敏机理提供理论参考。

## 1 飞秒激光加工光纤实验

### 1.1 实验仪器及参数

实验系统主要由飞秒激光加工系统、光谱仪、自制旋转光纤夹具、FBG 光纤组成。日本 CyberLaser 公司的 IFRIT 型钛宝石飞秒激光器 (Titanium gem femtosecond laser), 能够输出波长为 780 nm、频率为 1~1 000 Hz、平均输出功率为 1.1 W、输出光束直径为 5 mm 的飞秒激光。光纤夹具夹持光纤放置在三维加工平台 (实现 X、Y、Z 三轴移动, 移动精度分别为  $1\text{ }\mu\text{m} \times 1\text{ }\mu\text{m} \times 0.5\text{ }\mu\text{m}$ ), 自制旋转夹具用于固定和旋转光纤。光谱分析仪 (OSA 型, 波长分辨率为 0.05 nm,  $\Delta\lambda$  范围为 350~1 750 nm) 用来观测 FBG 光纤输出光谱。光纤采用输出波长为 1 319.6 nm、有效折射率为 1.445、光栅长为 9 mm、光纤光栅周期为 4 564 nm 的单模光纤。

### 1.2 飞秒激光加工光纤实验

采用相位掩模技术, 利用 248 nm 准分子激光器将光纤光栅写入标准单模光纤纤芯, 制备成 FBG 光纤; 然后, 利用钛宝石激光器在 FBG 光纤表面刻蚀了一种长度为 9 mm 直槽微结构。加工方法如下: 飞秒激光经过光路聚焦在光纤表面, 同时夹具夹持光纤样品置于精密三维移动平台上, 三维平台作 Y 轴移动, 配合激光完成直槽加工。所采用激光的加工参数为: 激光功率 20~50 MW, 扫描速度 4.5 mm/min。加工过程中采用实时电荷耦合元件 (charge coupled device, CCD) 相机对烧蚀过程进行了监测, 并用光谱分析仪对光栅光纤的反射光谱进行了实时监测。整个实验系统简图如图 1 所示。

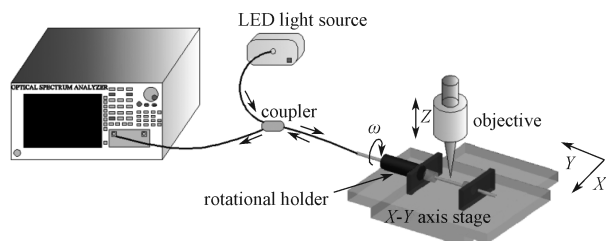


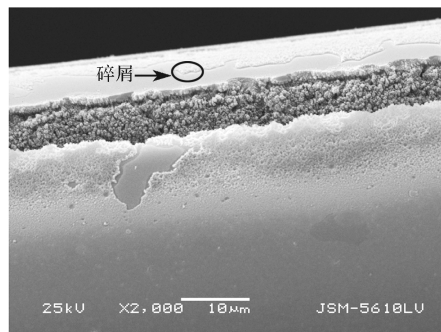
图 1 飞秒激光加工光纤实验系统简图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental system for femtosecond laser machining optical fiber

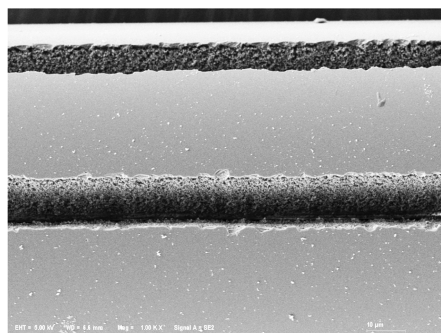
## 2 结果与分析

### 2.1 飞秒激光刻蚀 FBG 光纤表面形貌分析

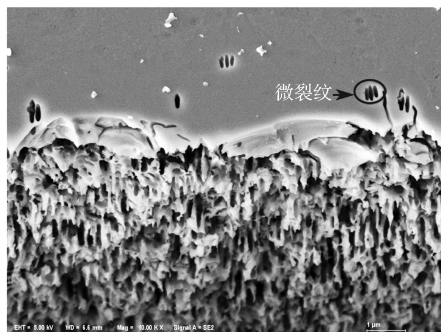
图 2 显示了使用飞秒激光 (功率为 22 MW, 平移速度为 4.5 mm/min) 烧蚀光纤的整体形貌。



a) 激光加工后

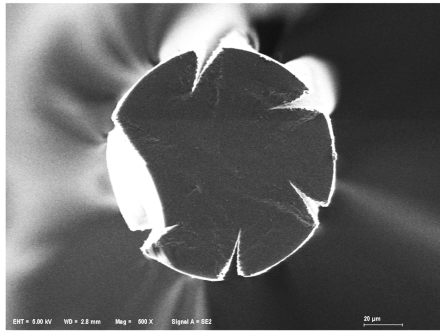


b) 经过化学腐蚀后



c) 微槽侧面





d) 光纤横截面

图2 光纤表面形貌

Fig. 2 Surface morphology of ablated fiber

由图 2a 可知, 光纤表层堆积一层微小碎屑, 这是由于激光功率极高, 烧蚀后沟槽较深, 烧蚀材料不能完全喷射到光纤表面, 所以在沟槽侧壁上沉积固化, 出现不规则的颗粒状, 且颗粒碎屑的体积随着脉冲能量或辐照时间的增加而增大。图 2b 为使用氢氟酸 (HF) 处理后的光纤表面形貌, 大部分的碎屑已被去除, 光纤表面变得光滑平整。图 2c 为槽侧壁的局部放大部分, 观察到其形态类似钟乳柱状, 光纤的晶粒方向与激光的偏振方向垂直, 在沟槽边缘存在一些零星的周期性条纹。这是因为在烧蚀过程中, 激光与靶材接触后产生材料等离子体, 当激光通过等离子体和溅射碎片时会发生激光反射或折射, 从而产生纳米裂纹; 当等离子体分布不均匀时, 激光束与等离子体界面相互作用, 在聚焦区产生周期性条纹并进一步电离。图 2d 为烧蚀光纤的横截面, 可以看出槽的形状与激光的高斯分布一致, 凹槽的深度约为  $24\ \mu\text{m}$ 。

利用最小二乘法对不同激光能量下的沟槽深度数据进行拟合, 结果如图 3 所示。

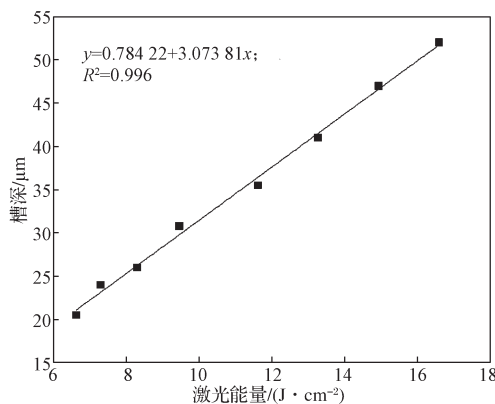


图3 激光能量与微槽深度关系

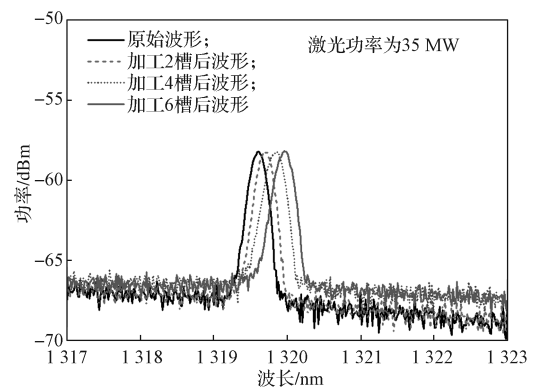
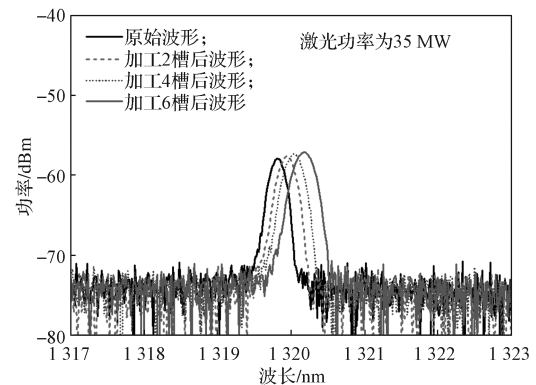
Fig. 3 Relationship between laser energy and groove depth

由图 3 可知, 拟合曲线方程中  $y$  表示刻蚀深度,  $x$  表示激光能量,  $R^2$  为线性拟合程度指标, 曲线方程与实验数据吻合较好。随着激光能量的增加, 微槽的深度也随着增加。

## 2.2 飞秒激光刻蚀 FBG 光纤对 FBG 光谱影响

### 2.2.1 激光刻蚀槽数的影响

图 4 为激光刻蚀不同槽数的 FBG 反射光谱。由图 4 可知, 反射光谱永久性地向长波方向偏移, 且随着凹槽数量的增加, 漂移量逐渐增大, 没有变形迹象, 但存在一定的光功率损耗。对比图 4a 与 4b, FBG 光纤中心波长的变化趋势基本一致, 不同之处在于图 4b 中波长漂移量更大, 且光谱带宽的变化也更大。这是因为: 与偏离光纤中心  $20\ \mu\text{m}$  的情况相比, 聚焦在光纤中心时激光辐射剂量对纤芯的影响要大得多, 波长漂移量和带宽变化更大一些。为了制作微结构的 FBG 传感器, 通常选择偏离光纤中心  $20\ \mu\text{m}$  为宜, 避免波形出现较大变化。

a) 激光偏离光纤中心  $20\ \mu\text{m}$ 

b) 激光对准光纤中心

图4 不同槽数的光栅光纤反射光谱

Fig. 4 The reflected spectrum of FBG fiber with different grooves

均匀光纤光栅的功率反射率  $r$  为

$$r = \frac{\sinh^2 \sqrt{(\kappa L)^2 - (\xi^+ L)^2}}{\cosh^2 \sqrt{(\kappa L)^2 - (\xi^+ L)^2} - \frac{\xi^{+2}}{\kappa^2}} \quad (1)$$

最大功率反射率  $r_{\max}$  为

$$r_{\max} = \tanh^2(\kappa L), \quad (2)$$

$$\kappa = \frac{\pi}{\lambda} s \bar{\delta}_{n_{\text{eff}}} \quad (3)$$

式(1)~(3)中:  $\kappa$  为交流耦合系数;  $\xi^+$  是直流耦合系数;  $s$  是折射率变化的条纹可见度;  $L$  为光栅的长度;  $\bar{\delta}_{n_{\text{eff}}}$  为折射率调制量;  $\lambda$  为波长。

由双曲正切函数式(2)可知, 最大功率反射率随着折射率变化的增加而变大, 图(4)的结果与耦合函数理论式(2)吻合较好。

### 2.2.2 激光功率及辐照时间的影响

本研究利用紫外 (ultra-violet, UV) 激光 (波长为 248 nm) 辐照单模光纤, 将 9 mm 长的 FBG 写入光纤纤芯, 一般称之为 I 型光栅<sup>[15]</sup>, 其折射率的变化与紫外光或多光子过程激发的中心缺陷变化有关。然后用激光能量强度超过光纤损伤阈值的红外激光照射 I 型光栅, 使其折射率发生变化。

根据方程式

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda, \quad (4)$$

$$\lambda_1 = 2(n_{\text{eff}} + \Delta n)\Lambda, \quad (5)$$

得到中心波长变化量为

$$\Delta\lambda = 2\Delta n\Lambda. \quad (6)$$

其中:  $\lambda_B$  为布拉格波长;  $\lambda_1$  是激光照射后的中心反射波长;  $\Delta\lambda$  为波长的变化量;  $n_{\text{eff}}$  为纤芯折射率;  $\Delta n$  折射率调制变化量;  $\Lambda$  为光栅栅距。折射率的变化与标准光纤或熔融二氧化硅中的变化相同, 与辐照时间和能量的增长成正比<sup>[16-18]</sup>。

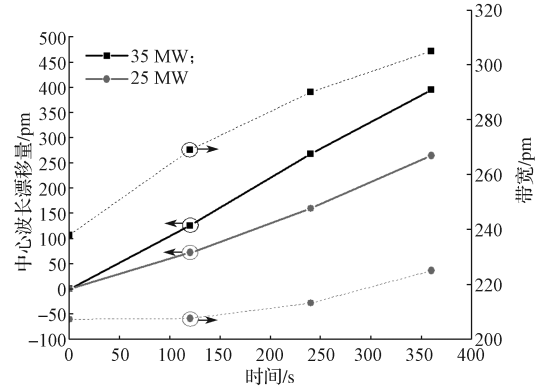
根据式(7)中给出的光波导模耦合理论<sup>[19]</sup>, 带宽也受激光辐照的影响。

$$\Delta\lambda_0 = \frac{\lambda_B s \bar{\delta}_{n_{\text{eff}}}}{n_{\text{eff}}} \sqrt{1 + \left( \frac{\lambda_B}{s \bar{\delta}_{n_{\text{eff}}} L} \right)^2}. \quad (7)$$

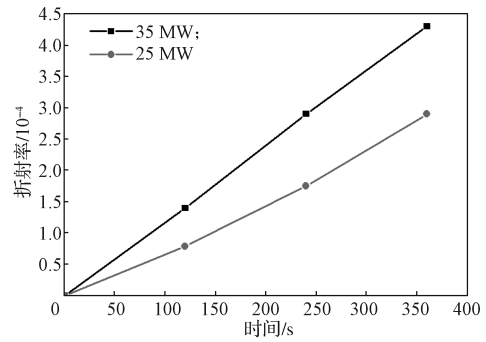
其中:  $\Delta\lambda_0$  是带宽;  $L$  是光栅的长度。对于强光栅, 带宽随着折射率变化的增大而增大, 实验结果与表达式所得结论一致。

激光功率、辐照时间对 FBG 光纤反射谱带宽、中心波长漂移量及折射率的影响如图 5 所示。根据式(6)将图 5a 中波长偏移的值进行替换, 获得图 5b

所示的折射率变化量。



a) 不同激光功率下波长漂移和带宽的变化



b) 折射率与辐照时间关系

图 5 激光功率、激光辐照时间对 FBG 光纤  
漂移量、带宽及折射率的影响

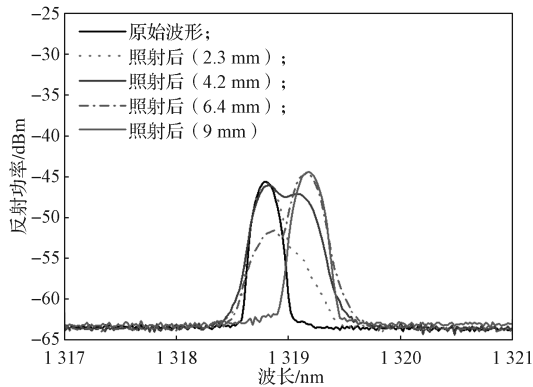
Fig. 5 Effects of laser power and laser irradiation time  
on wavelength shift, bandwidth and refractive  
index of FBG fiber

由图 5a 可知, 随着激光辐照时间的增加, 中心波长漂移量和带宽不断增大。当辐照时间为 360 s、激光加工功率分别为 35 MW 和 25 MW 时, 波长分别向长波方向移动 397 pm 和 270 pm, 带宽分别为 305 pm 和 225 pm。光纤中心波长的变化主要是由于激光引起光纤折射率的变化。图 5b 为光纤折射率与激光辐照时间的关系曲线, 随着激光辐照时间的增加, 光纤折射率随之升高。当激光功率为 35 MW、辐照时间为 360 s 时, 光纤折射率变化量为  $4.4 \times 10^{-4}$ ; 当激光功率为 25 MW、辐照时间为 360 s 时, 光纤折射率变化量为  $2.9 \times 10^{-4}$ 。

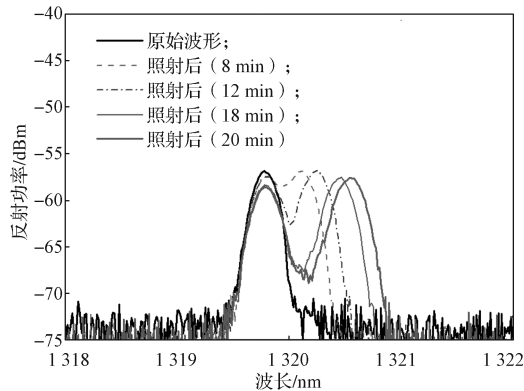
### 2.2.3 FBG 刻蚀长度及辐照时间的影响

激光刻蚀光纤过程中, FBG 的反射光谱随 FBG 长度及辐照时间的变化曲线如图 6 所示。图 6a 显示了激光完成整个直槽刻蚀过程中光谱的变化。当约有一半光栅长度的包层区域被烧蚀时, 波形严重变形并

出现对称双峰；但随着激光烧蚀光纤包层总长度的增加，双峰逐渐消失。该结果表明折射率调制对反射波形有影响，其机理与相移光栅相似。图 6b 显示了当激光烧蚀到一半长度时，不同激光辐照时间 FBG 反射光谱的变化。随着激光辐照时间的增加，反射光谱中出现波长为 1 320.1nm 的透射尖峰，并逐渐增长，但在辐照 20 min 后停止增长，表明该区域折射率变化量已达饱和。这是由于光栅中折射率的变化会引起光相位的变化，从而导致光纤中的传输光在该处发生相移。



a) FBG 的反射光谱随着 FBG 烧蚀长度的变化关系



b) FBG 的反射光谱随着激光辐照时间的变化关系

图 6 激光加工过程中 FBG 光纤反射光谱

Fig. 6 FBG fiber reflection spectrum during laser processing

### 2.3 实验仿真分析

根据实验光谱结果及式 (8)，绘制了再生折射率调制图，结果如图 7 所示。其中，实线表示折射率的原始调制曲线，点线表示 fs 激光照射后的再生折射率调制曲线。

$$\left[ \Delta n_{\text{eff}}(L) = \Delta n_{2\text{max}} \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda} L\right) \right]. \quad (8)$$

由于激光刻蚀过程中的工艺参数相同 (fs 激光频率为 1 kHz，光斑半径约为 10  $\mu\text{m}$ ，扫描速度为 90  $\mu\text{m}/\text{s}$ )，相邻两光斑基本重叠因此 fs 激光引起的折射率变化可以假定为均匀调制，同时激光不会改变光栅间距。最终，fs 激光引起的折射率变化与折射率调制的原始轮廓重叠，导致纤芯有效折射率和中心波长的增加。同样，带宽随着辐照时间或激光能量的增加而永久增加。

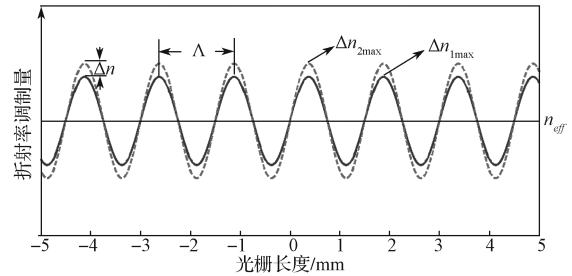


图 7 折射率调制原理

Fig. 7 Refractive index modulation principle

参照实验折射率变化量结果，仿真参数“ac”分别设置为  $1.8 \times 10^{-4}$ 、 $2.5 \times 10^{-4}$ 、 $2.9 \times 10^{-4}$ ，依据波导耦合理论，烧蚀约一半光栅长度 (3.84 mm) 在不同折射率调制下无相移 (黑线) 和有相移 (红、蓝、紫线) 的反射光谱，如图 8 所示。“ac”指数变化为  $1.8 \times 10^{-4}$ 、 $2.5 \times 10^{-4}$ 、 $2.9 \times 10^{-4}$  时，分别对应红色、蓝色、紫色线。仿真结果较好匹配了图 6b 所得的实验结果。

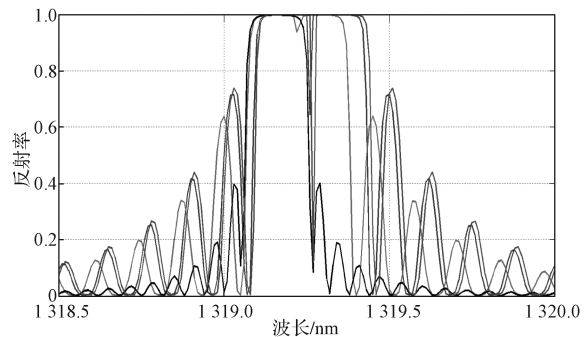


图 8 实验仿真相移光谱图

Fig. 8 Spectrogram of experiment simulation phase shift



彩图

### 2.4 FBG 光纤退火实验分析

在光纤加工过程中，观察到反射波形存在严重变形的现象，如反射波带宽大幅度加宽，即使采用较小的激光能量，中心波长也会偏移几十皮米，但停止激



光照射后反射波形即可恢复。这是由于库仑爆炸和等离子体的作用,在聚焦区会产生高温,从而导致反射波发生变形;当激光停止照射时,温度对光栅的影响消失,波形逐渐恢复。

为了验证色心理论是否有助于折射率的变化<sup>[16]</sup>,本研究将刻蚀后的光纤在 300 °C 退火 1 h,观察退火前后光栅光纤波形的变化,结果如图 9 所示。

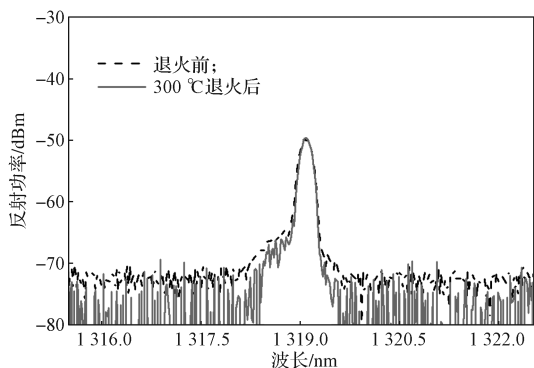


图 9 300 °C 退火前后光栅光纤波形

Fig. 9 Waveform before and after annealing at 300 °C

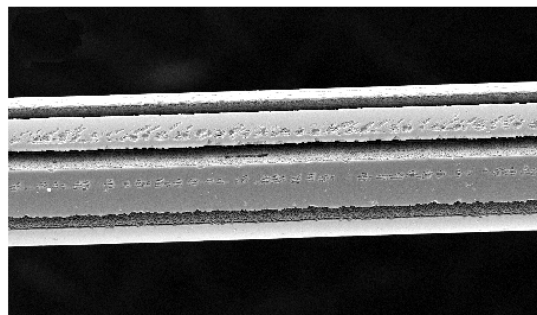
由图 9 可知,退火前后光栅光纤的波形没有明显变化,仅观察到由于热诱导应力松弛引起的少量功率损失;退火后光栅光纤的中心波长不变,但仍存在永久折射率变化。由此表明折射率变化可能不是由色心理论引起的。

### 3 微结构探头应用

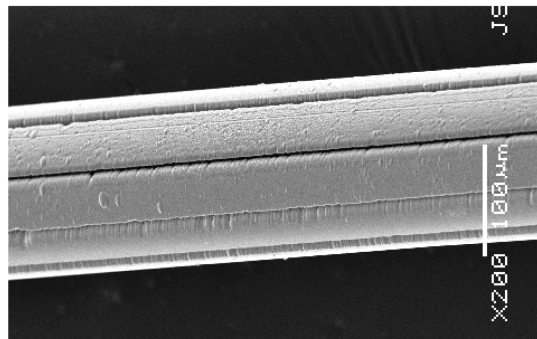
FBG 光纤表面加工微结构后,可在微结构表面镀上传感材料。微结构能够容纳多种敏感材料,因此其具有增敏作用,可以进一步拓展 FBG 光纤的应用领域。

射磁致伸缩材料 TbDyFe 在磁场作用下能够发生伸缩变化,在光纤表面产生相应的应力,拉伸光纤,使得 FBG 光纤中心波长发生变化,从而感知磁场强度的变化。钯 / 银复合薄膜对氢气敏感,能够吸收氢气发生膨胀,同样使得 FBG 光纤波长发生变化。本研究分别在微结构样品上溅射磁致伸缩材料 TbDyFe 和钯 / 银复合薄膜,制备了光纤磁传感探头和光纤氢传感探头。两种镀膜厚度不同, TbDyFe 膜的厚度约为 4.6  $\mu\text{m}$ ,钯膜的厚度约为 520 nm。利用扫描电子显微镜 (scanning electron microscope, SEM) 观察制得的光纤磁传感探头 (涂有 TbDyFe 薄膜) 和光纤氢传感探头 (涂有 Pd/Ag 薄膜) 样品的微观形貌,结

果如图 10 所示。



a) 镀 Pd/Ag 膜氢气传感探头



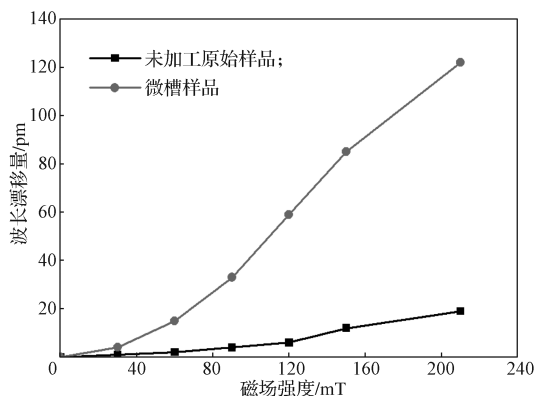
b) 镀 TbDyFe 膜磁场传感探头

图 10 微结构探头 SEM 图

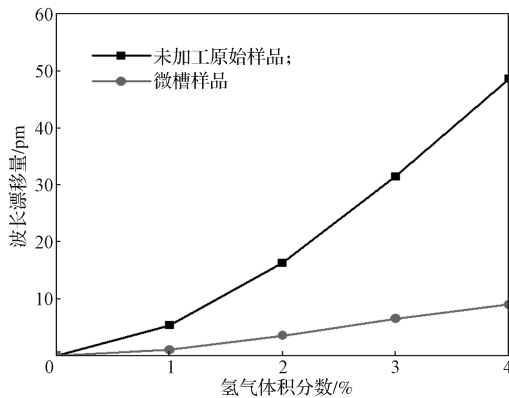
Fig. 10 SEM of micro structured probe

由图 10 可以看出,钯 / 银复合薄膜和 TbDyFe 膜较均匀的镀在光纤表面,镀膜均匀致密有助于提高微结构光纤传感性能,为后续传感实验提供较好的实验基础。

为了研究微结构对传感增敏性能的影响,本研究选用加工了 8 个微槽的 FBG 光纤与未加工的光纤作对比,研究光纤磁传感探头和光纤氢传感探头两种传感器的中心波长漂移与磁场强度、氢气含量的关系,结果如图 11 所示。



a) 光纤磁传感探头



b) 光纤氢传感探头

图 11 两种传感探头中心波长漂移量变化曲线

Fig. 11 The variation curves of the central wavelength shift of the two sensors

由图 11a 可知, 随着磁场强度的增大, 两种光纤磁传感探头的波长迁移量均不断增大, 8 个微槽的 FBG 磁传感探头的波长漂移量变化更为显著; 8 个微槽 FBG 磁传感探头的灵敏度最高可达 0.6 pm/mT, 而原始光纤探头的灵敏度最高约为 0.1 pm/mT。由图 11b 可知, 随着氢气含量的增大, 两种光纤氢传感探头的波长迁移量均不断增大, 8 个微槽的 FBG 氢传感探头的波长漂移量增大更明显; 当氢气体积分数为 4% 时, 8 个微槽的 FBG 氢传感探头对氢气的响应灵敏度约为原始光纤探头的 5 倍。由此表明, 微结构能够有效提高传感材料的传感性能。

## 4 结论

利用飞秒激光在光栅光纤包层上制备三维直槽微结构, 并研究了微结构 FBG 光纤的表面形貌, 以及激光诱导的折射率变化, 并以微型结构光栅光纤磁传感探头和氢传感探头为例进行了实验研究, 得到了以下结论。

1) 随着激光能量的增加, 槽深变深, 去除磨屑后, 槽的表面微观形貌变为钟乳柱状, 柱状方向与激光偏振方向垂直。

2) 在光纤加工过程中, 激光能量和辐照时间增加对光纤折射率变化和带宽影响较大。随着激光能量和辐照增加, 光纤折射率变化量会持续增大, 最终达到饱和, 同时光纤带宽也相应变大。利用光纤耦合理论, 进行了理论仿真验证。

3) 光纤中诱导结构变化的机理主要是由高冲击激光功率引起光纤中的应力和密度引起的, 通过退火

实验排除了色心理论。

4) 镀有 TbDyFe 涂层的 FBG 磁传感探头的磁灵敏度比原始 FBG 探头提高了 5 倍以上, 镀有 Pd/Ag 涂层的 FBG 氢传感探头的氢气灵敏度提高了 4 倍以上。因此, 微结构 FBG 具有制作简单、成本低、灵敏度高优点, 在传感领域具有广阔的应用前景。

## 参考文献:

- [1] SAMSUDIN M R, SHEE Y G, MAHAMAD ADIKAN F R, et al. Fiber Bragg Gratings Hydrogen Sensor for Monitoring the Degradation of Transformer Oil[J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(9): 2993–2999.
- [2] KARANJA J M, DAI Y T, ZHOU X, et al. Femtosecond Laser Ablated FBG Multitrenches for Magnetic Field Sensor Application[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(16): 1717–1720.
- [3] WANG Y, WANG D N, YANG M W, et al. Refractive Index Sensor Based on a Microhole in Single-Mode Fiber Created by the Use of Femtosecond Laser Micromachining[J]. Optics Letters, 2009, 34(21): 3328.
- [4] DAI Y T, YANG M H, XU G, et al. Magnetic Field Sensor Based on Fiber Bragg Grating with a Spiral Microgroove Ablated by Femtosecond Laser[J]. Optics Express, 2013, 21(14): 17386–17391.
- [5] KARANJA J M, DAI Y, ZHOU X, et al. Micro-Structured Femtosecond Laser Assisted FBG Hydrogen Sensor[J]. Optics Express, 2015, 23(24): 31034–31042.
- [6] SUGIOKA K, CHENG Y. Femtosecond Laser Three-Dimensional Micro- and Nanofabrication[J]. Applied Physics Reviews, 2014, 1(4): 041303.
- [7] MARTÍNEZ-MATOS Ó, HERNÁNDEZ-GARAY M P, IZQUIERDO J G, et al. Femtosecond Laser Induced Damage Characterization of Transmission Volume Phase Gratings[J]. Applied Physics Letters, 2014, 105(4): 041905.
- [8] 陈梓泳, 何俊, 徐锡镇, 等. 飞秒激光逐点法制备光纤布拉格光栅高温传感器阵列[J]. 光学学报, 2021, 41(13): 1306002.  
CHEN Ziyong, HE Jun, XU Xizhen, et al. High-Temperature Sensor Array Based on Fiber Bragg Gratings Fabricated by Femtosecond Laser Point-by-Point Method[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(13): 1306002.
- [9] 郑家鑫, 高炳荣, 薛亚飞, 等. 飞秒激光辅助刻蚀制

- 备蓝宝石光栅(特邀)[J]. 光子学报, 2021, 50(6): 92-98.
- ZHENG Jiaxin, GAO Bingrong, XUE Yafei, et al. Fabrication of Sapphire Grating by Femtosecond Laser Assisted Etching(Invited)[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(6): 92-98.
- [10] SCHAFFER C B, GARCÍA J F, MAZUR E. Bulk Heating of Transparent Materials Using a High-Repetition-Rate Femtosecond Laser[J]. Applied Physics A, 2003, 76(3): 351-354.
- [11] CHAN J W, HUSER T, RISBUD S, et al. Structural Changes in Fused Silica after Exposure to Focused Femtosecond Laser Pulses[J]. Optics Letters, 2001, 26(21): 1726-1728.
- [12] MIURA K, QIU J R, INOUE H, et al. Photowritten Optical Waveguides in Various Glasses with Ultrashort Pulse Laser[J]. Applied Physics Letters, 1997, 71(23): 3329-3331.
- [13] CHENG G, MISHCHIK K, MAUCLAIR C, et al. Ultrafast Laser Photoinscription of Polarization Sensitive Devices in Bulk Silica Glass[J]. Optics Express, 2009, 17(12): 9515-9525.
- [14] MISHCHIK K, D'AMICO C, VELPULA P K, et al. Ultrafast Laser Induced Electronic and Structural Modifications in Bulk Fused Silica[J]. Journal of Applied Physics, 2013, 114(13): 133502.
- [15] CANNING J. Fibre Gratings and Devices for Sensors and Lasers[J]. Laser & Photonics Reviews, 2008, 2(4): 275-289.
- [16] WILL M, NOLTE S, CHICHKOV B N, et al. Optical Properties of Waveguides Fabricated in Fused Silica by Femtosecond Laser Pulses[J]. Applied Optics, 2002, 41(21): 4360.
- [17] STRELTISOV A M, BORRELLI N F. Fabrication and Analysis of a Directional Coupler Written in Glass by Nanojoule Femtosecond Laser Pulses[J]. Optics Letters, 2001, 26(1): 42-43.
- [18] GUO H C, JIANG H B, FANG Y, et al. The Pulse Duration Dependence of Femtosecond Laser Induced Refractive Index Modulation in Fused Silica[J]. Journal of Optics A: Pure and Applied Optics, 2004, 6(8): 787-790.
- [19] GUPTA S, MIZUNAMI T, SHIMOMURA T. Computer Control of Fiber Bragg Grating Spectral Characteristics Using a Thermal Head[J]. Journal of Lightwave Technology, 1997, 15(10): 1925-1928.

(责任编辑: 李玉华)

## Femtosecond Laser Etching Characteristics of FBG and Sensing Applications

ZHOU Xian<sup>1,2</sup>, LIU Kefei<sup>1,2</sup>, ZHANG Xin<sup>1</sup>, ZHANG Haibo<sup>1,2</sup>, MING Xingzu<sup>3</sup>

(1. Hubei Key Laboratory of Power System Design and Test for Electrical Vehicle, Hubei University of Arts and Science, Xiangyang Hubei 441053, China; 2. School of Mechanic Engineering, Hubei University of Arts and Science, Xiangyang Hubei 441053, China; 3. College of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

**Abstract:** Micro-trench was fabricated into the cladding of fiber Bragg grating (FBG), and FBG sensors sensitivity was improved, with its sensing application field broadened. Type I fiber Bragg grating structure damage was induced by focused femtosecond (fs) laser to form inscribed micro-structured fiber. Fiber surface and internal structure damages due to refractive index change by modulating the laser power and irradiation time were also investigated, with the effect of fs laser on the morphology of micro-trench and reflectivity spectrum of FBG discussed as well. The morphological results showed that, the surface of micro-trench had many pimples due to solidification of debris, and the pimples were growing with increasing laser energy. The depth of the groove and shape obeyed Gaussian energy distribution. Meanwhile the reflectivity spectrum was red shifted permanently and the bandwidth increased with growing laser power and irradiation time. Using the sensitization performance of micro-structured optical fiber, the sensing properties of the micro-structured fiber grating magnetic field probe and the hydrogen gas probe can be improved effectively.

**Keywords:** femtosecond laser; fiber Bragg grating; refractive index; microstructure