

# 光学学报

## 基于薄壁柚子型微结构光纤的探针式压强传感器

郭家豪<sup>1,2\*</sup>, 黄全斌<sup>3</sup>, 练思平<sup>1,2</sup>, 梁德志<sup>1\*\*</sup>, 于永芹<sup>1\*\*\*</sup>, 杜晨林<sup>1</sup>, 阮双琛<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 深圳技术大学先进光学精密制造技术广东普通高校重点实验室, 广东 深圳 518060;

<sup>2</sup> 广西师范大学物理科学与技术学院, 广西 桂林 541004;

<sup>3</sup> 深圳技术大学中德智能制造学院, 广东 深圳 518060

**摘要** 采用光纤熔接技术将薄壁柚子微结构光纤与单模光纤进行熔接制作成探针式的压强传感器, 该微结构光纤一端开放的空气孔可以与外界压强相连通, 实现压强响应, 获得了 0.70 nm/MPa 的压强灵敏度, 并且具有良好的线性度。通过有限元法模拟和实验结果对比发现该微结构光纤传感器存在 LP<sub>01</sub> 和 LP<sub>11</sub> 模式的干涉, 并证明了该传感器具有良好的稳定性和重复性。

**关键词** 光纤传感器; 微结构光纤; 压强传感; 模式干涉

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1306015

## Probe-Type Pressure Sensor Based on Thin-Walled Grapefruit Microstructured Fiber

Guo Jiahao<sup>1,2\*</sup>, Huang Quanbin<sup>3</sup>, Lian Siping<sup>1,2</sup>, Liang Dezhi<sup>1\*\*</sup>, Yu Yongqin<sup>1\*\*\*</sup>, Du Chenlin<sup>1</sup>, Ruan Shuangchen<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Key Laboratory of Advanced Optical Precision Manufacturing Technology of Guangdong Higher Education Institutes, Shenzhen Technology University, Shenzhen, Guangdong 518060, China;

<sup>2</sup> College of Physical Science and Technology, Guangxi Normal University, Guilin, Guangxi 541004, China;

<sup>3</sup> Sino-German College of Intelligent Manufacturing, Shenzhen Technology University, Shenzhen, Guangdong 518060, China

**Abstract** The thin-walled grapefruit microstructured fiber and single-mode fiber are welded by fiber fusion technology to make a probe-type pressure sensor. The open air hole at one end of the microstructure fiber can communicate with the external pressure to realize the pressure response. The pressure sensitivity of 0.70 nm/MPa is obtained and the pressure response has good linearity. Through the comparison between the finite element simulation and experimental result, it is found that the microstructured fiber sensor has the interference of LP<sub>01</sub> and LP<sub>11</sub> modes, and it is proved that the sensor has good stability and repeatability.

**Key words** fiber optics sensors; microstructured fiber; pressure sensing; mode interference

**OCIS codes** 060.2370; 060.2310; 060.4005

### 1 引言

光纤压强传感器具有体积小、质量轻、抗电磁干

扰强、测量灵敏度高、安全性高等优点<sup>[1-6]</sup>, 近年来在医疗、国防、高温油井、航空航天<sup>[7-11]</sup>等领域得到了广泛的应用。现有报道的光纤压强传感器均是利用

收稿日期: 2021-04-01; 修回日期: 2021-04-16; 录用日期: 2021-05-19

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(61935014)、国家重点研发计划子课题(2016YFA0401103)、深圳市科技项目重点项目(JCYJ20200109144012410)

通信作者: \*guojiahao18@163.com; \*\*liangdezhi@sztu.edu.cn; \*\*\*yuyongqin@sztu.edu.cn

待测压强与敏感元件的形变之间的关系来开展测量的<sup>[12]</sup>,例如法布里-珀罗干涉仪(FPI)以及光纤布拉格光栅(FBG)。2011 年, Ma 等<sup>[13]</sup>通过将  $\text{SiO}_2$  毛细管熔合到单模光纤(SMF)末端并对毛细管内部施压,然后熔化腰部的毛细管以形成气腔,制作成 FPI。2015 年,Poeggel 等<sup>[14]</sup>将 SMF 与 FBG 熔接后封装在毛细管中,再将毛细管一侧制成薄膜来形成 FPI 以进行温度与压强的测量。2020 年,吕欢祝等<sup>[15]</sup>采用将光纤光栅封装在聚碳酸酯聚合物内的方式来提升传感器的压强响应灵敏度。2015 年,本课题组<sup>[16]</sup>提出一种基于空芯光子晶体光纤两端熔接 SMF,同时利用飞秒激光微加工技术制作的光纤法布里-珀罗干涉传感器,获得了 4.385 nm/MPa 的压强灵敏度,比 Sagnac 干涉型(3.46 nm/MPa)<sup>[17]</sup>、双芯光纤错位的模式干涉型(3.47 nm/MPa)<sup>[15]</sup>以及光纤微腔型(315 pm/MPa)<sup>[18]</sup>传感器的压强灵敏度大。但是这种结构的传感器需要飞秒激光微加工技术,加工成本高。本文提出一种基于 SMF 和薄壁柚子微结构光纤(TW-GMF)放电熔接制作的探针式压强传感器,并对其压强响应进行了测试分析,结果显示该传感器对压强的灵敏度好、线性度高且制作简单。

## 2 理论模型

### 2.1 理论仿真

实验中采用国产 TW-GMF,在 50×显微镜下光纤截面图如图 1 所示,整个光纤端面包括 6 个空气孔和纯石英材料构成的纤芯和包层。6 个空气孔围成六角形状的纤芯,使光纤端面呈现柚子形状。由于空气的折射率( $n=1$ )比石英的折射率低,GMF 的导光模式为折射率引导型,遵循全反射原理,光被限制在纤芯传输中进而形成纤芯模式。GMF 的纤芯尺寸约为 15  $\mu\text{m}$ ,包层直径为 125  $\mu\text{m}$ 。在 6 个空气孔中,仅有 1 个空气孔边长缩小为 21  $\mu\text{m}$ ,其余 5 个边长均为 28  $\mu\text{m}$ ,这打破了纤芯的六角对称性,使纤芯模式具有双折射特性。

采用有限元法(FEM)对 GMF 的模场分布和传输特性进行研究<sup>[19]</sup>。利用 FEM 分析的优势在于其能够对具有任意形状、大小以及分布的空气孔的微结构光纤进行求解。FEM 求解电磁场方程主要是将麦克斯韦方程转换成本征值问题,其特征值为  $\beta/k_0$ ,即等效折射率,其中,  $\beta$  为传播常数,  $k_0$  为真空中的波数。

麦克斯韦方程的形式为

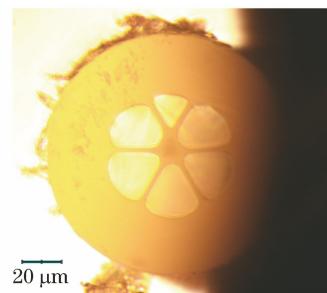


图 1 TW-GMF 截面显微图

Fig. 1 Microscope image of the cross section of TW-GMF

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\epsilon_r} \nabla \times \mathbf{E} \right) - k_0^2 \mu_r \mathbf{E} = 0, \quad (1)$$

其特征向量,即电场分量  $\mathbf{E}$  的形式为

$$\mathbf{E}(x, y, z) = \tilde{\mathbf{E}}(x, y) \exp(-ik)z^z. \quad (2)$$

首先,将求解区域  $\Omega$  分割成有限个小单元格记作  $\Omega^e$  ( $e=1, 2, 3, \dots, M$ ),  $M$  为小单元格的数目,即将来求解区域离散化。利用三角形单元来划分单元格,因为其更适用于无规则区域。其次,采用二阶多项式作为插值函数表达每个单元中的未知解,并且在每个三角形单元结构上具有 6 个节点,如图 2(a)所示,其中 3 个位于三角形的顶点表示电场的轴向分量,另外 3 个在每条边的中点代表电场的切向分量。

未知函数  $\Phi$  为电场分量,二阶多项式表示为

$$\Phi^e(x, y) = a^e + b^e x + c^e y + d^e x^2 + f^e xy + h^e y^2, \quad (3)$$

再将(1)式变换成一个本征值问题进行求解可得到本征方程为

$$[A]\{\Phi\} - \lambda[B]\{\Phi\} = \{0\}, \quad (4)$$

式中,  $[A]$ 、 $[B]$  为稀疏对称矩阵。

构建如图 2(b)所示的网格化分割模型,图 2(b)右边为网格划分在纤芯处的放大图。设置 GMF 气孔的折射率为 1,纤芯的折射率为 1.4628 且边界条件为完美边界条件,根据(4)式在波长范围 1500~1650 nm 内进行参数化扫描得到如图 3 所示的 GMF 的传输特性与模场分布,以及如图 4 所示的纤芯模式色散曲线。

由图 3 可知, TW-GMF 支持的纤芯模式有  $\text{LP}_{01}(x)$ 、 $\text{LP}_{01}(y)$ 、 $\text{LP}_{11}$  的四个简并模式。纤芯基模  $\text{LP}_{01}$  的两个互相正交的偏振模式(X 偏振和 Y 偏振)的模场分布如图 3(a)和图 3(b)所示,图中的箭头表示每个模式模场分布对应的横向电场的振幅和方向。在 1550 nm 处,  $\text{LP}_{01}$  模的模式有效折射率

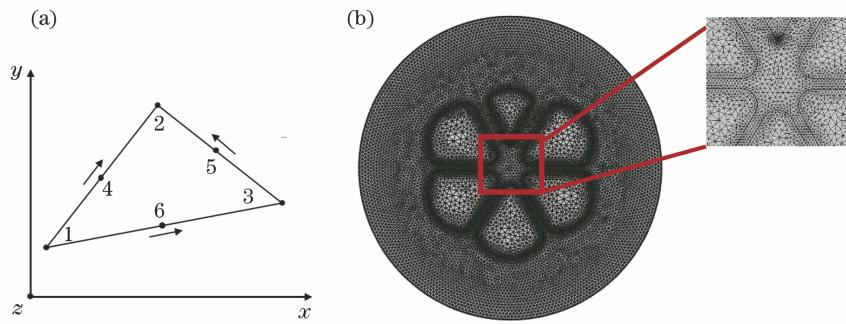
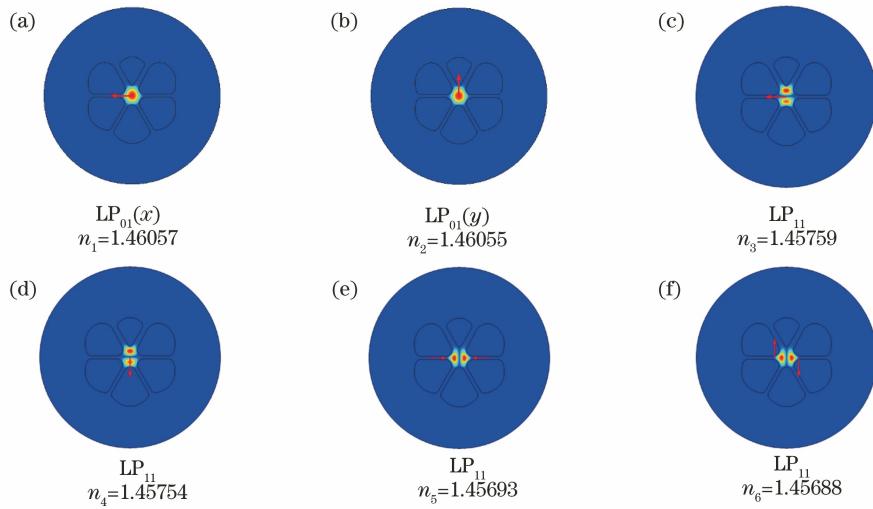


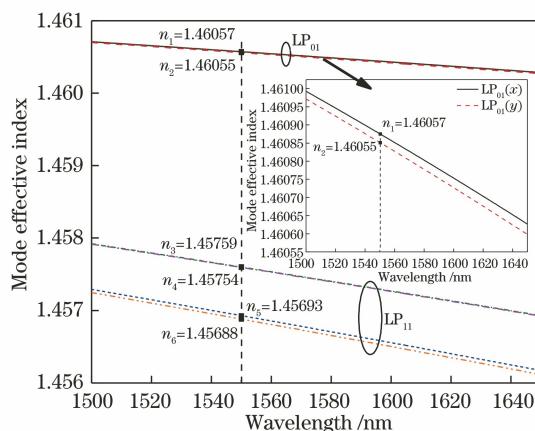
图 2 仿真建模示意图。(a)三角形元素示意图;(b)FEM 中三角形网格的划分

Fig. 2 Simulation modeling diagram. (a) Schematic diagram of a triangular element; (b) devision of triangular mesh in FEM

图 3 模拟的 TW-GMF 的纤芯模式在 1550 nm 处的模场分布图。(a)  $LP_{01}(x)$ ,  $n_1 = 1.46057$ ; $n_2 = 1.46055$  ;(b)  $LP_{01}(y)$ ,  $n_2 = 1.46055$ Fig. 3 Mode field distributions of core mode of simulated TW-GMF at 1550 nm. (a)  $LP_{01}(x)$ ,  $n_1 = 1.46057$ ; $n_2 = 1.46055$  ;(c)  $LP_{11}$ ,  $n_3 = 1.45759$ ; (d)  $LP_{11}$ ,  $n_4 = 1.45754$ ; (e)  $LP_{11}$ ,  $n_5 = 1.45693$ ; (f)  $LP_{11}$ ,  $n_6 = 1.45688$ 

分别为  $n_1 = 1.46057$  和  $n_2 = 1.46055$ , 对应的折射率差为  $0.2 \times 10^{-4}$ 。 $LP_{11}$  模的模场分布如图 3(c)~图 3(f) 所示, 其模式有效折射率分别为  $n_3 = 1.45759$ 、 $n_4 = 1.45754$ 、 $n_5 = 1.45693$ 、 $n_6 = 1.45688$ ,  $LP_{11}$  与基模的折射率差  $\Delta n_{\text{eff}}$  的范围是  $2.98 \times 10^{-3} \sim 3.67 \times 10^{-3}$ 。从图 4 可以看出, 在  $1500 \sim 1650$  nm 波长范围内, 6 个模式折射率与波长呈线性关系。经过线性拟合,  $LP_{11}$  的模式折射率曲线斜率为  $-7.38676 \times 10^{-6}$ ,  $LP_{01}$  模的模式折射率曲线斜率为  $-2.48265 \times 10^{-6}$ , 即  $LP_{11}$  的模式折射率曲线斜率比  $LP_{01}$  基模的大; 图 4 插图为  $LP_{01}(x)$  和  $LP_{01}(y)$  的模式折射率曲线放大图, 与波长呈线性关系。

通过模拟仿真可以得到模式有效折射率的虚部, GMF 的损耗曲线如图 5 所示<sup>[20]</sup>, 其计算公式可表示为

图 4 模拟的 TW-GMF 纤芯模式的折射率曲线。插图为  $LP_{01}(x)$  和  $LP_{01}(y)$  的模式折射率曲线放大图Fig. 4 Refractive index curves of core mode of simulated TW-GMF. Insert is the enlarged view of refractive index curves of  $LP_{01}(x)$  and  $LP_{01}(y)$  modes

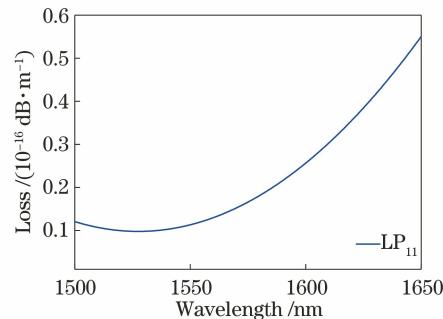


图 5 GMF 的模式损耗随波长的变化曲线

Fig. 5 Variation curve of mode loss of GMF with wavelength

$$L_c(\lambda) = \frac{2 \times 10^7}{\ln 10} \frac{2\pi}{\lambda} \text{Im}(n_{\text{eff}}) \quad (5)$$

## 2.2 干涉原理

提出一种基于折射率引导型 TW-GMF 探针式压强传感器, 其结构示意图如图 6 所示。光经过 SMF 与 GMF 的界面进入 GMF 纤芯区域传输, 由于柚子光纤的纤芯直径约为  $15 \mu\text{m}$ , 比 SMF 的大, 因此光束进入 GMF 后模场得到扩展, 部分能量从纤芯基模耦合到纤芯高阶模, 不同模式被限制在纤芯中继续向前传播, 直到遇到光纤端面反射后返回, 在界面处再次耦合进 SMF, 干涉区域的长度即为 GMF 的长度, 而激发到包层的包层模则经过 GMF 的传输后被耗散掉。根据双光束干涉的理论分析,

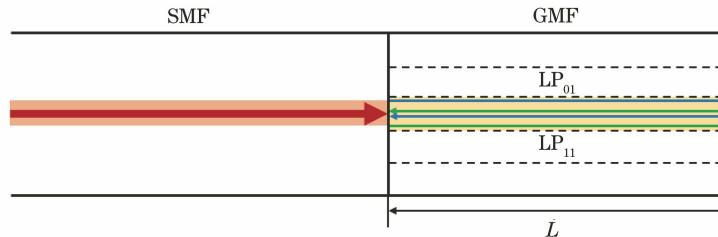


图 6 基于折射率引导型 TW-GMF 的反射式干涉结构示意图

Fig. 6 Schematic diagram of reflecting modal interference structure based on refractive index guided TW-GMF

## 3 实验结果与讨论

实验中 GMF 传感器结构主要是利用熔接机电弧放电, 将一段 GMF 的一端与标准 SMF 熔接, 在熔接处修改熔接机的熔接参数进而避免 GMF 的空气孔塌陷<sup>[23-24]</sup>, 结构示意图如图 6 所示。传感器结构的损耗大小、干涉光谱对比度和稳定性的好坏均受到 GMF 空气孔塌陷程度的影响, 而塌陷程度与熔接时熔接机放电电流、放电时间和放电次数密切相关<sup>[23]</sup>。实验发现放电电流过大、放电时间过长等都会导致光纤在熔接处塌陷变形, 引起较大的损耗,

光经过 GMF 反射后进入单模光纤的干涉强度可表示为<sup>[21-22]</sup>

$$I(\lambda) = I_1(\lambda) + I_2(\lambda) + 2\sqrt{I_1(\lambda) \cdot I_2(\lambda)} \cos \phi, \quad (6)$$

式中,  $I(\lambda)$  为工作波长  $\lambda$  处的干涉信号的总光强,  $I_1(\lambda)$  和  $I_2(\lambda)$  分别为波长  $\lambda$  处 GMF 纤芯基模的光强和高阶模的光强,  $\phi$  为纤芯基模和高阶模的相位差。当相位差满足  $\pi$  的奇数倍时, 光谱出现干涉波谷, 即

$$\phi = \frac{2\pi\Delta n_{\text{eff}} L}{\lambda} = (2m+1)\pi, m \text{ 为整数}, \quad (7)$$

第  $m$  级透射波谷的中心波长可表示为

$$\lambda_m = \frac{2(n_{\text{eff}}^c - n_{\text{eff}}^H)L}{2m+1}, m \text{ 为整数}, \quad (8)$$

式中:  $L$  是两个相互干涉模式的传输长度, 即 GMF 的长度;  $m$  是整数, 表示干涉光谱级数;  $\lambda$  是透射波谷的中心波长;  $n_{\text{eff}}^c$  和  $n_{\text{eff}}^H$  分别为 GMF 纤芯基模和高阶模的有效折射率;  $\Delta n_{\text{eff}}$  为纤芯基模和纤芯高阶模的有效折射率差, 即  $\Delta n_{\text{eff}} = n_{\text{eff}}^c - n_{\text{eff}}^H$ 。单一的干涉光谱呈现周期振荡, 如果光谱中相邻两个条纹的峰值波长分别为  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$ , 那对应的条纹间隔为  $\Lambda$ , 则有:  $\Lambda = \lambda_2 - \lambda_1$ , 并满足以下条件

$$\Lambda = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\Delta n_{\text{eff}} \cdot L}. \quad (9)$$

光谱很差。因此在制作传感器过程中, GMF 与 SMF 的熔接放电电流、放电时间分别设置为  $5 \text{ mA}$  和  $0.8 \text{ s}$ , 放电次数为 1 次, 熔接点的显微图片如图 7 中右图所示。在显微镜下切割光纤, 利用微移平台可以控制切割光纤的长度, 如图 7 中左图所示。在实验过程中, 通过将宽带光源 (SLED, 1510 ~ 1650 nm)、光谱分析仪 (OSA, AQ6370B) 与 SMF 用环形器连接, 可以实时观察干涉光谱的变化。

实验中在 SMF 尾端熔接了不同长度的 GMF, 长度分别为  $L = 2, 5, 7 \text{ cm}$ , 在室温下该结构的反射光谱如图 8 所示, 干涉光谱的对比度大于  $12 \text{ dB}$ , 在

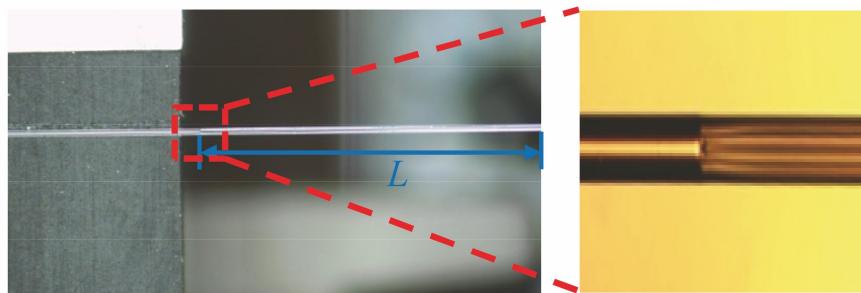


图 7 传感器结构在显微镜下的影像图。右图为熔接点处的局部放大

Fig. 7 Image of sensor structure under microscope. Image on the right is the local magnification of fusion point

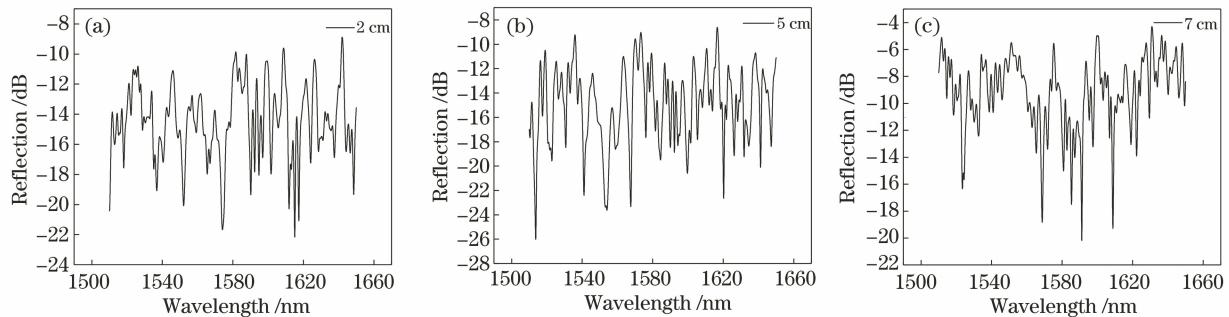


图 8 不同长度 GMF 传感器的反射光谱。(a)  $L = 2 \text{ cm}$ ; (b)  $L = 5 \text{ cm}$ ; (c)  $L = 7 \text{ cm}$

Fig. 8 Reflection spectra of GMF sensors with different lengths. (a)  $L = 2 \text{ cm}$ ; (b)  $L = 5 \text{ cm}$ ; (c)  $L = 7 \text{ cm}$

1550 nm 附近光谱的条纹间隔分别约为 15.7、6.5、5.2 nm。根据(7)式可计算得到  $\text{LP}_{01}$  和  $\text{LP}_{11}$  的有效折射率差  $\Delta n_{\text{eff}}$  分别为  $3.78 \times 10^{-3}$ 、 $3.69 \times 10^{-3}$ 、 $3.44 \times 10^{-3}$ 。而利用有限元仿真模拟得到有效折射率差  $\Delta n_{\text{eff}}$  为  $2.89 \times 10^{-3} \sim 3.67 \times 10^{-3}$ , 比较可知实验中计算所得的结果和理论分析的结果接近, 表明反射光谱中存在  $\text{LP}_{01}$  和  $\text{LP}_{11}$  相互干涉产生的光谱成分。但在图 8 中可以看出光谱图并不是规律的正弦曲线, 说明反射光谱中不止一种干涉, 即在 SMF 与 GMF 熔接点处不仅仅激发出了一种高阶模。由于 GMF 的纤芯对称性降低而具有双折射特性, 使得纤芯中  $\text{LP}_{01}$  模在 X 和 Y 两个相互垂直的方向具有不同的模式折射率, 同时  $\text{LP}_{11}$  模的多个简并模也有着不同的模式折射率。这就意味着, 在 GMF 纤芯中基模  $\text{LP}_{01}$  至少和 4 个  $\text{LP}_{11}$  相互干涉, 即不是单一的双光束干涉, 因此较多的模式间的干涉叠加使得反射光谱不是很明显。

为了测试不同长度 GMF 传感器的压强响应特性, 搭建了如图 9 所示的测试系统。将光纤环形器的 1、3 两端分别与 SLED 与 OSA 相连, 2 端与传感器 SMF 端相连, 将传感器密封在与压强计相连的空腔内。设置压强计从 0 MPa 逐渐升压到 0.9 MPa, 每隔 0.1 MPa 对传感器的反射光谱进行一次数据记录。实验中分别对 2、5、7 cm 的 GMF

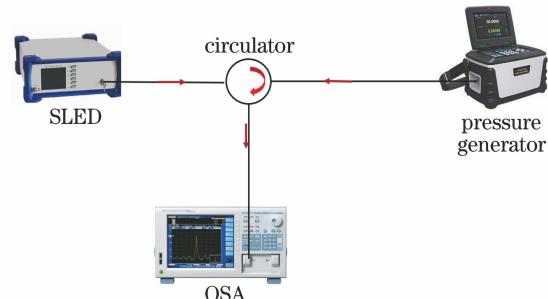


图 9 压强传感测量的实验装置示意图

Fig. 9 Schematic diagram of experimental setup for pressure sensing measurement

传感器进行压强实验测量。对 1550 nm 附近的波谷进行追踪, 测得其对应的反射光谱如图 10 中的插图所示, 压强响应曲线如图 10 所示。三个长度的 GMF 传感器压强响应线性度都在 0.99 以上。通过线性拟合获得对应的压强灵敏度分别为 0.57、0.70、0.67 nm/MPa, 即长度的改变对压强灵敏度的影响很小。

由干涉理论可知干涉光束间的相位差变化, 会引起干涉光谱的变化, 所以在光谱上可以直观反映出干涉光谱条纹峰值的漂移。由于 GMF 的 6 个空气孔与外界空气连通, 所以在密封腔内加压时 GMF 外壁与气孔同时受到空气压强作用。同时, 压强对传感结构长度  $L$  的影响很小, 可以忽略, 故该传感

结构几乎不发生几何形变。GMF 的空气孔中空气密度增加使其模式折射率随压强的增加而增加,进而引起纤芯模式间的相位差变化,导致干涉光谱条纹峰值的漂移,因此通过观测干涉条纹峰值漂移量即可得到 GMF 传感器对压强的传感灵敏度。

压强增大,引起空气折射率的变化为

$$n(p) = n_0 + \frac{\partial n}{\partial p} \Big|_{p=p_0} \Delta p, \quad (10)$$

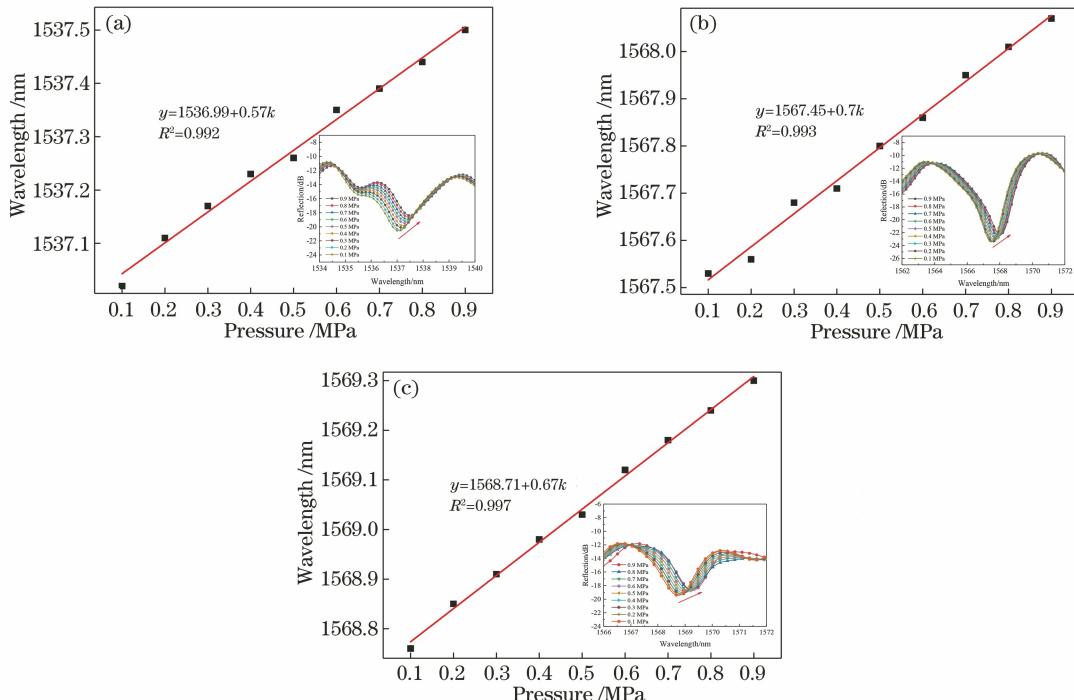


图 10 不同长度的 GMF 传感器的压强传感特性

Fig. 10 Pressure sensing characteristics of GMF sensors with different lengths

实验中还测试了 GMF 传感器对压强响应的稳定性。选择恒温且稳定测试环境,通过控制压强源使得气室内压强在 0、0.6、0.9 MPa 之间切换,每个压强下至少保持 30 min,得到的压强响应稳定性如图 11 所示,从图中可以看出,在同一压强下该光纤

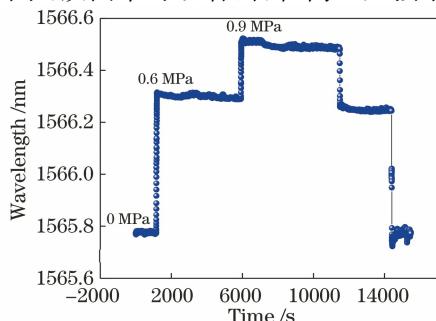
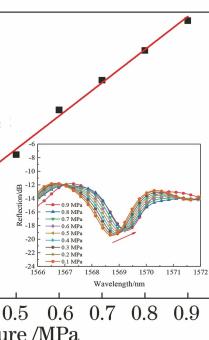
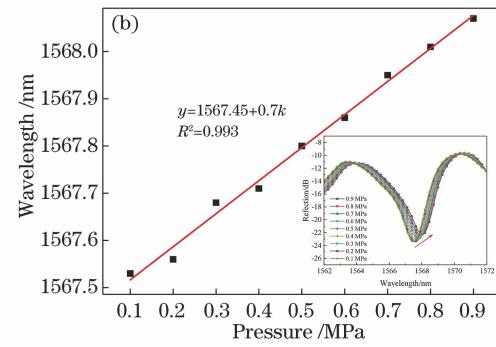


图 11 在不同的压强之间切换时,GMF 传感器波长对压强响应的稳定性

Fig. 11 Response stability of GMF sensor wavelength to pressure when switching between different pressures

通过有限元仿真,在不加压与加压 0.9 MPa 时,LP<sub>11</sub> 模的有效折射率改变量为  $1 \times 10^{-7}$ 。而压强灵敏度为 0.70 nm/MPa、在不加压与加压 0.9 MPa 时,干涉波长漂移量为 0.63 nm,对应的模式折射率改变量为  $5 \times 10^{-7}$ ,即实验值与仿真值接近。因此,传感头对压强的响应原理为外界压强的变化会引起 GMF 的纤芯模场分布发生改变,进而引起模式有效折射率的改变和干涉光谱的漂移。



传感器的干涉波谷漂移很小,具有很好的稳定性。并且,该 GMF 传感器对压强变化的响应时间也非常短,说明其响应灵敏<sup>[22]</sup>。

#### 4 结 论

将 GMF 与 SMF 熔接,利用熔接点和 GMF 端面的反射构成探针式光纤压强传感器,并利用 FEM 进行了 GMF 模式分布和色散特性的理论模拟。在 GMF 与 SMF 熔接点处激发高阶模式,产生模式干涉,利用双光束干涉理论分析得到此处存在 LP<sub>01</sub> 与 LP<sub>11</sub> 模式的干涉。对不同长度的 GMF 进行压强响应实验,结果表明压强灵敏度与长度关系不大,这样有利于减小 GMF 光纤的长度从而减小传感头的尺寸。提出的传感器具有体积小、质量轻、制作简单等优点,在石油化工、矿工、航天航空、化学化工等领域具有广泛的应用前景。

## 参 考 文 献

- [1] Jiang J F, Liu T G, Zhang Y M, et al. Parallel demodulation system and signal-processing method for extrinsic Fabry-Perot interferometer and fiber Bragg grating sensors[J]. Optics Letters, 2005, 30(6): 604-606.
- [2] Shangguan C M, He W, Zhang W, et al. Optical fiber Fabry-Perot displacement sensor based on chemical etching method [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2018, 39(2): 170-173.
- 上官春梅, 何巍, 张雯, 等. 化学腐蚀法制备的光纤Fabry-Perot位移传感器[J]. 半导体光电, 2018, 39(2): 170-173.
- [3] Guo T, Qiao X G, Jia Z A, et al. Technology of fiber gratings sensing and its applications in petroleum industry [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2004, 18(3): 208-213.
- 郭团, 乔学光, 贾振安, 等. 光纤光栅传感技术及其在石油工业中的应用[J]. 测试技术学报, 2004, 18(3): 208-213.
- [4] Liang S J, Zhou C M, Fan D, et al. Experimental study on photonic crystal fiber sensing system based on optical-borne microwave interference[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(5): 050602.
- 梁斯靖, 周次明, 范典, 等. 光载微波干涉光子晶体光纤传感系统实验研究[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(5): 050602.
- [5] Xu Y, Zhang L, Tong L M. Optofluidic micro-nanofiber sensors [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(17): 170614.
- 许悦, 张磊, 童利民. 光流控微纳光纤传感器[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(17): 170614.
- [6] Guo C Y, Wang D D, Mu C L. Progress on optical fiber sensors based on graphene/graphene oxide[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(15): 150003.
- 郭晨瑜, 王豆豆, 穆长龙. 基于石墨烯/氧化石墨烯的光纤传感器研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(15): 150003.
- [7] Haga Y, Esashi M. Biomedical microsystems for minimally invasive diagnosis and treatment [J]. Proceedings of the IEEE, 2004, 92(1): 98-114.
- [8] Xiao S R, Zhu P, Ben F L. Analysis on characteristics of optical fiber sensor for atmospheric pressure [J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(6): 1042-1047.
- 肖韶荣, 朱平, 贲富来. 光纤气压传感器特性分析[J]. 光学精密工程, 2008, 16(6): 1042-1047.
- [9] Zheng Z X, Huang Y Q. Diaphragm type optical fiber MEMS pressure sensors based on F-P cavity interference[J]. Acta Photonica Sinica, 2012, 41(12): 1488-1492.
- 郑志霞, 黄元庆. 基于F-P腔干涉的膜片式光纤微机电系统压力传感器[J]. 光子学报, 2012, 41(12): 1488-1492.
- [10] Zhao Y, Liao Y B. Research on the laser fiber-optic pressure measurement technique for offshore oil exploration[J]. Chinese Journal of Lasers, 2002, 29(10): 955-958.
- 赵勇, 廖延彪. 激光光纤压力检测技术在海洋石油勘探中的应用研究[J]. 中国激光, 2002, 29(10): 955-958.
- [11] Peng B J, Zhao Y, Meng Q Y, et al. Fiber Bragg grating high-pressure sensor with temperature compensation [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2006, 46(4): 484-487.
- 彭保进, 赵勇, 孟庆尧, 等. 具有温度补偿的光纤光栅压力传感器[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2006, 46(4): 484-487.
- [12] Wang Z, Wu Z T, Wen G R, et al. A fiber optic pressure sensing technology based on thin diaphragm structure[J]. Explosion and Shock Waves, 2019, 39(6): 77-84.
- 王昭, 吴祖堂, 温广瑞, 等. 一种薄膜式的光纤压力传感技术[J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(6): 77-84.
- [13] Ma J, Ju J, Jin L, et al. A compact fiber-tip micro-cavity sensor for high-pressure measurement [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2011, 23(21): 1561-1563.
- [14] Poeggel S, Duraibabu D, Tosi D, et al. Differential *in vivo* urodynamic measurement in a single thin catheter based on two optical fiber pressure sensors [J]. Journal of Biomedical Optics, 2015, 20(3): 037005.
- [15] Lü H Z, Zhong W B, Qin L, et al. Research on characteristics of fiber grating-based pressure sensor using polymer packaging [J]. Laser Journal, 2020, 41(8): 63-67.
- 吕欢祝, 钟文博, 秦亮, 等. 聚合物封装的光纤光栅压力传感器的特性研究[J]. 激光杂志, 2020, 41(8): 63-67.
- [16] Yu Y Q, Chen X, Huang Q D, et al. Enhancing the pressure sensitivity of a Fabry-Perot interferometer using a simplified hollow-core photonic crystal fiber with a microchannel [J]. Applied Physics B, 2015, 120(3): 461-467.
- [17] Fu H Y, Tam H Y, Shao L Y, et al. Pressure sensor realized with polarization-maintaining photonic crystal fiber-based Sagnac interferometer[J]. Applied Optics, 2008, 47(15): 2835-2839.
- [18] Chen D R, Hu G F, Chen L X. Dual-core photonic crystal fiber for hydrostatic pressure sensing [J].

- IEEE Photonics Technology Letters, 2011, 23(24): 1851-1853.
- [19] Brechet F, Marcou J, Pagnoux D, et al. Complete analysis of the characteristics of propagation into photonic crystal fibers, by the finite element method [J]. Optical Fiber Technology, 2000, 6(2): 181-191.
- [20] Gu Q Z, Li Q H. Novel photonic crystal fiber with high birefringence and low loss [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(6): 060603.  
谷芊志, 励强华. 一种高双折射、低损耗的新型光子晶体光纤[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(6): 060603.
- [21] Villatoro J, Minkovich V P, Pruneri V, et al. Simple all-microstructured-optical-fiber interferometer built via fusion splicing[J]. Optics Express, 2007, 15(4): 1491-1496.
- [22] Chen X. The sensing characteristics of microstructure optic fiber interferometer [D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2015.  
陈雪. 干涉型微结构光纤传感器的传感特性研究 [D]. 深圳: 深圳大学, 2015.
- [23] Hu D J J, Wang Y X, Lim J L, et al. Novel miniaturized Fabry-Perot refractometer based on a simplified hollow-core fiber with a hollow silica sphere tip[J]. IEEE Sensors Journal, 2012, 12(5): 1239-1245.
- [24] Wang Y, Wang D N, Liao C R, et al. Temperature-insensitive refractive index sensing by use of micro Fabry-Perot cavity based on simplified hollow-core photonic crystal fiber[J]. Optics Letters, 2013, 38(3): 269-271.