

高灵敏度刻槽型长周期光纤光栅应变传感器

刘宇 李云梅* 路永乐 周帆 钟懿

重庆邮电大学光电工程学院光电信息感测与传输技术重点实验室, 重庆 400065

摘要 采用优化改进的 CO₂ 激光器制备了两种不同刻槽深度的长周期光纤光栅(LPFG), 实验研究了光纤光栅刻槽区结构对应变传感特性的影响。研究表明: 单侧周期性刻槽会在光纤光栅表面形成应力集中区, 在轴向应变作用下发生微弯形成波状型结构, 从而极大地提高了其应变响应灵敏度, 深刻槽光纤透射谱的谐振波长线性漂移达到 -10.96 nm, 应变灵敏度达到 -19.37 pm/μ ϵ , 且测量误差小。利用有限元分析软件 ANSYS 对刻槽型光纤光栅进行网格建模和模态仿真分析, 得到其刻槽结构区的应变分布图。结果表明, 深刻槽型光纤光栅随着应变增加, 轴向微弯形变量增大, 从而激发高阶包层模的耦合, 提高了应变灵敏度响应。

关键词 光纤光学; 长周期光纤光栅; 刻槽工艺; 应变灵敏度; 微弯位移量

中图分类号 O436.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.100602

High-Sensitivity Strain Sensor of Long Period Fiber Grating Based on Grooved Technology

Liu Yu Li Yunmei Lu Yongle Zhou Fan Zhong Yi

Key Laboratory of Photoelectronic Information Sensing and Transmitting Technology, College of Photoelectronic Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China

Abstract Two kinds of long period fiber gratings (LPFGs) with different grooved depths are fabricated by means of the improved CO₂ laser beam. The influence of the grooved structure of the fiber grating on the strain sensing characteristics is studied experimentally. The research results show that the stain concentration is occurred in the surface of the fiber grating because of the one-side periodical groove, and the grooved fiber grating slightly is bent to form corrugated structure, so the strain sensitivity response is greatly enhanced. Resonance wavelength of the transmission spectrum of the deeply grooved fiber can linearly drifts to -10.96 nm, the sensitivity can get to -19.37 pm/μ ϵ and the measurement error is very small. The mesh modeling and static simulation of the grooved fiber grating are realized based on the finite element analysis software ANSYS, and then the strain distribution of the grooved structure section is obtained. The principal research and experimental testing demonstrate that the axial micro-bend deformation of the grooved LPFG increase with the increase of strain, so that the grooved fiber can trigger high-order cladding mode coupling, and improve strain sensitivity response.

Key words fiber optics; long period fiber grating; grooved technology; strain sensitivity; microbend displacement

OCIS codes 060.2430; 220.4610; 060.2370; 230.1950

1 引言

长周期光纤光栅(LPFG)是通信和传感领域的一种新型无源器件。在传感领域,可用于对应变、温度、压强、扭转和折射率等物理量的测量^[1-3]。光纤型传感器作为一种波长调制型的光子器件^[4],具有质量轻、体积小^[5]、精度高、可复用性^[6]、抗腐蚀性、热稳定性好^[7]及温度可调谐性^[8]等优点,在传感领域研究广泛^[9]。

收稿日期: 2016-06-02; **收到修改稿日期:** 2016-06-06; **网络出版日期:** 2016-09-20

基金项目: 国家自然科学基金(51175535)、重庆市科委科技平台与基地建设项目(cstc2014ghz0038)、重庆市基础与前沿研究计划项目(cstc2015jcyjBX0068)

作者简介: 刘宇(1972—),男,博士,教授,主要从事光学传感方面的研究。E-mail: liuyu@cqupt.edu.cn

* **通信联系人.** E-mail: liyunmei212@sina.com

LPFG 写入方法很多,常见的方法有离子束入射法、紫外光写入法、电弧放电法和机械微弯法。这些方法各有缺点,需要进一步完善。Rao 等^[10]提出一种由计算机控制的聚焦高频 CO₂ 激光脉冲在普通单模光纤 (SMF) 中写入 LPFG 的方法,此种方法利用 CO₂ 激光频率高、扫描能量集中、加热周期短、扩散小、激光加热效率高的优势,能够低成本、高质量、高效率地写入 LPFG。目前对于刻槽结构型的光纤光栅应变传感器的研究相对较少^[11-13],申昊文等^[14]提出了一种刻槽封装式光纤光栅传感器,通过分析基底刻槽封装的材料弹性模量来分析平均应变灵敏度及传递率,但这种方法不仅耗时且光透射谱谐振波长变化不明显。Tang 等^[5]研究了刻槽光纤的膨胀型结构的光子晶体光栅,它是利用高压气泵往光子晶体光纤的空气孔中填充气压,然后用激光脉冲横向扫描光纤制得,成本高,结构复杂,对材料要求也比较高。Wang 等^[12]利用 CO₂ 激光写入普通光纤光栅并研究其轴向应变传感特性,研究得出没有刻槽结构型传感器的应变灵敏度非常低,仅为 $-0.45 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 。如果采用深刻槽型光纤制作的应变传感方式则能够克服灵敏度低、成本高及稳定性差等缺点,在同等精度水平上其制作方便、平台简单。因此如何制备简单可靠、性能优异的应变传感器,无论对理论研究还是在实际应用中都具有重要意义。

本文采用优化聚焦的高频 CO₂ 激光束在普通单模光纤上制备不同刻槽深度的光纤光栅,针对刻槽型光纤光栅的应变传感进行研究,并利用光谱技术对刻槽型光纤光栅的谐振和微弯特性进行了分析。借助有限元分析软件 ANSYS 仿真分析了刻槽型 LPFG 的应变传感特性。

2 实验装置及原理

图 1(a) 为周期性刻槽型 LPFG 的制作原理示意图,主要是通过采用改进的 CO₂ 激光写入系统 (SYNRAD48-1),在 CO₂ 激光器上增加一个闭环系统,可在原功率稳定性为 $\pm 10\%$ 的基础上提高 $\pm 1.8\%$,并使用周期性点对点加热技术。实验中输入是宽带光源,三维高精度扫描振镜由计算机控制。CO₂ 激光光束能够按照要求在光纤的 x 轴方向开始扫描,扫描时间为一个光栅周期,接着让激光束沿着光纤的 y 轴扫描一次,按照类似方法继续扫描光纤下一个光栅。其光谱变化曲线图是由频谱分析仪 (OSA) 显示。

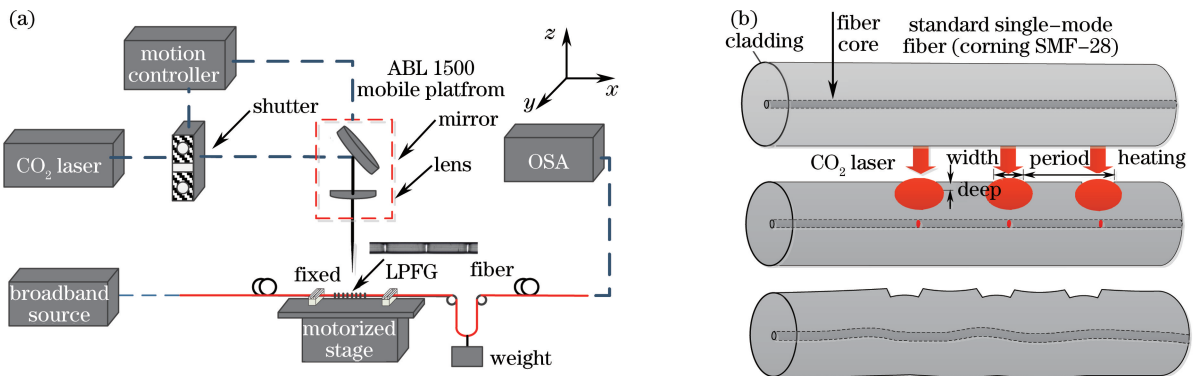


图 1 (a) 刻槽型 LPFG 实验制作平台示意图; (b) CO₂ 激光刻制刻槽型 LPFG 示意图

Fig. 1 (a) Schematic diagram of the grooved LPFG experimental platform; (b) schematic diagram of the grooved LPFG fabrication by CO₂ laser

本实验需要进行 N 次扫描和轴向转换过程 (N 是光栅周期数),上述制备过程需要反复经过 M 次 (M 是循环扫描周期次数)。从图 1(b) 可以看出聚焦 CO₂ 激光重复扫描光纤会在光纤上产生一个局部高温区域,并使光纤表面的 SiO₂ 气化,进而在光纤光栅表面发生熔融微弯形变形成周期性刻槽,从而影响激发多阶包层模的耦合,改变光透射谱特性。通常输出 CO₂ 激光脉冲的频率为 5 kHz,全功率为 10 W,平均功率为 0.5 W,线性平台沿 Y 轴扫描速度为 0.5 mm/s。多次扫描才能引起光纤纤芯残余应力发生变化,从而使折射率发生很明显的周期性变化。残余热应力表示为

$$\delta_{\text{residual}}(r) = \int_{T_0}^{T_k} \frac{E(r)}{1-\nu(r)} [\alpha(r) - c(T)] dT, c(T) = \frac{2}{R_f^2} \int_0^{R_f} \alpha(r) r dr, \quad (1)$$

式中 $\nu(r)$, $E(r)$, T_0 , T_k , T , $\alpha(r)$, R_f 依次表示为半径 r 的泊松比、弹性模量、室温、冷却温度、温度、热膨胀

系统及半径。光纤光栅的有效折射率变化表示为

$$\delta n_{\text{eff}} = \overline{\delta n_{\text{eff}}} \left\{ 1 + \gamma \cos \left[\frac{2\pi}{\Lambda} t + \phi(t) \right] \right\}, \quad (2)$$

式中 Λ 为光栅的周期, $\overline{\delta n_{\text{eff}}}$ 为平均有效折射率的变化, t 为时间, γ 为折射率调制的条纹可见度, $\phi(t)$ 表示光栅的啁啾, 制备的光纤光栅的谐振波长为

$$\lambda_{\text{res}}^m = \Lambda (n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{eff}}^{\text{cl},m}) \cdot \left[1 + \frac{\frac{d\lambda_D^m}{d\Lambda} (\delta n_{\text{eff}}^{\text{co}} - \delta n_{\text{eff}}^{\text{cl},m})}{(n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{eff}}^{\text{cl},m})^2} \right], \quad (3)$$

式中 $n_{\text{eff}}^{\text{co}}$ 和 $n_{\text{eff}}^{\text{cl},m}$ 表示光纤纤芯基模和一阶 m 次包层模的有效折射率, $\delta n_{\text{eff}}^{\text{co}}$ 和 $\delta n_{\text{eff}}^{\text{cl},m}$ 表示纤芯基模和一阶 m 次包层模有效折射率的变化, λ_D^m 表示一阶 m 次包层模的设计波长, 也即初始谐振波长。CO₂ 激光束扫描光纤形成的刻槽型光纤光栅应变传感器的折射率调制主要由三部分构成, 表达式为

$$\Delta n = \Delta n_{\text{residual}} + \Delta n_{\text{stretch}} + \Delta n_{\text{groove}}, \quad (4)$$

式中的 $\Delta n_{\text{residual}}$ 是不对称刻槽型 LPFG 内部热应力释放引起的折射率变化, Δn_{groove} 是周期性槽产生的初始折射率变化, $\Delta n_{\text{stretch}}$ 是轴向应变产生的初始折射率变化。随着应变的增加, 其表达式可以表示为

$$\Delta n_{\text{stretch}} = \Delta n_{\text{microbend}} + \Delta n_{\text{strain}}, \quad (5)$$

式中 $\Delta n_{\text{microbend}}$ 是 CO₂ 激光束单侧入射在光纤表面时, 由于局部高温、光纤熔融变形、单侧刻槽结构轴向微弯产生的折射率变化, Δn_{strain} 主要是光纤刻槽区域和未刻槽区域之间由于弹光效应产生的折射率变化。

图 2(a) 为 LPFG₁ 的光谱曲线图, 由图可以看出随着激光束循环扫描周期次数 M 的增加, 光透射谱的谐振峰幅值逐渐增大, 带宽逐渐变窄, 光栅谐振波长逐渐向短波方向漂移, 但是漂移量较小。通过 20 次循环扫描后, 可以获得谐振波长为 $\lambda_1 = 1541.2$ nm, 谐振峰幅值为 $A_1 = -38.458$ dB, 刻槽深度为 $D_1 = 20$ μm , 插入损耗为 2.8 dB, 光栅周期数为 $N = 30$, 栅距为 $\Lambda = 420$ μm , 此外, 还可以观察到其他谐振峰, 说明此光纤光栅激发了其他高阶模式与基模发生模式耦合。刻槽深度为 $D_1 = 20$ μm , 在光纤一侧已经产生足够深度。光纤凹槽深度一旦超过 20 μm , 光纤光栅的透射谱将会消失。图 2(b) 为 LPFG₂ 的光谱曲线图, 经过多次扫描可以得出其谐振波长为 $\lambda_2 = 1554.2$ nm, 谐振峰幅值为 $A_2 = -31.33$ dB, 刻槽深度为 $D_2 = 2$ μm 。

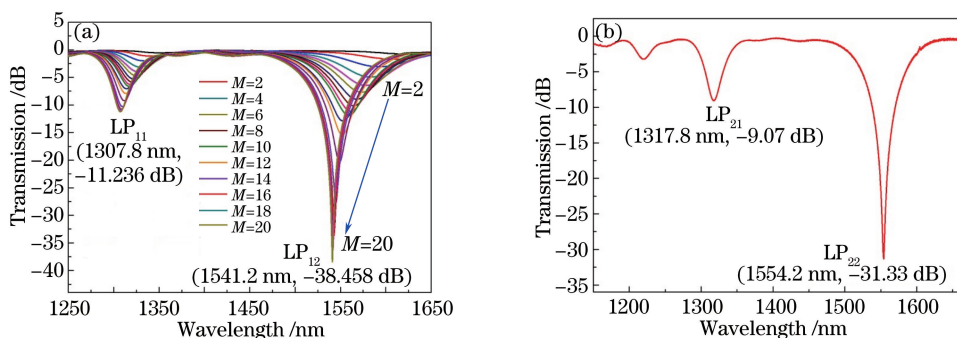


图 2 刻槽型 LPFG 透射谱。(a) LPFG₁; (b) LPFG₂

Fig. 2 Transmission spectra of the grooved LPFG. (a) LPFG₁; (b) LPFG₂

图 3 为刻槽式 LPFG 的轴向应变响应特性装置图, 利用微调位移平台沿光纤轴向施加拉伸应力, 提供轴向应变。

通过力学和弹光效应分析得出, 将刻槽型 LPFG 自由端施加一定的轴向应变, 光纤纤芯基模、包层模折射率调制都会发生一系列变化, 但都是轴向应变的函数。根据光纤相位匹配条件可知微应变 ξ 公式为

$$\xi = 10^{-6} \Delta l / L, \quad (6)$$

式中 L 表示平台之间的初始距离, 设为 $L = 200$ mm, Δl 为微位移平台移动的距离。根据微应变公式可知, 平台每移动 20 mm 对光栅施加的轴向拉伸应变为 100 $\mu\epsilon$ 。光纤光栅发生轴向应变时, 应变灵敏度会发生相应的变化, 应变灵敏度可以表示为

$$\frac{d\lambda_{\text{res}}}{d\epsilon} = \left(\frac{dn_{\text{eff}}^{\text{co}}}{d\epsilon} - \frac{dn_{\text{eff}}^{\text{cl},m}}{d\epsilon} \right) \Lambda + (n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{eff}}^{\text{cl},m}) \frac{d\Lambda}{d\epsilon}. \quad (7)$$

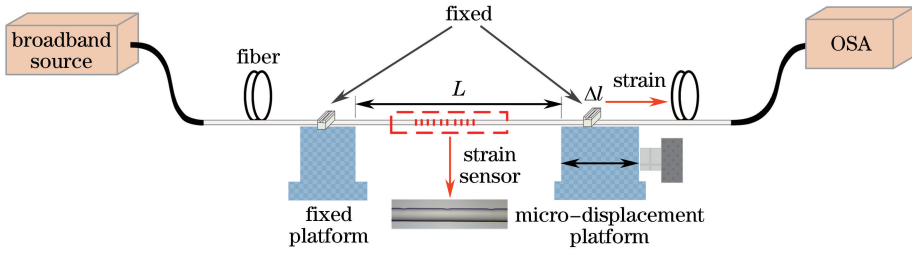


图3 刻槽式的 LPFG 轴向应变测试的装置图

Fig. 3 Schematic diagram for strain test of grooved LPFG along the axial direction

在 CO_2 激光制作的刻槽型 LPFG 自由端施加一定横向拉伸应变, LPFG 刻槽和未刻槽区域存在不一样的轴向应变。由弹性力学和弹光效应理论可知, 轴向应变在光纤刻槽区域和未刻槽区域的引起的折射率及折射率之差 Δn_{strain} 分别为^[15]

$$\Delta n_{\text{ungroove}} = -\frac{1}{2} p_e [n_{\text{ungroove}}^{(0)}]^3 \cdot \frac{\xi S}{r_{\text{ungroove}}^2}, \quad (8)$$

$$\Delta n_{\text{groove}} = -\frac{1}{2} p_e [n_{\text{groove}}^{(0)}]^3 \cdot \frac{\xi S}{\pi r_{\text{groove}}^2}, \quad (9)$$

$$\Delta n_{\text{strain}} = \Delta n_{\text{groove}} - \Delta n_{\text{ungroove}} = -\frac{1}{2} p_e [n_{\text{groove}}^{(0)}]^3 \left(1 - \frac{r_{\text{ungroove}}^2}{r_{\text{groove}}^2}\right) \xi S, \quad (10)$$

式中 p_e 是泊松比影响下的有效弹光系数, $n_{\text{groove}}^{(0)}$ 与 $n_{\text{ungroove}}^{(0)}$ 分别是 LPFG 在施加拉伸力前的刻槽和未刻槽区域的初始折射率调制, S 为光纤的横截面积, r_{ungroove} 为未刻槽区域的半径, r_{groove} 为 LPFG 的不对称槽结构的有效半径。

图 4(a) 为光纤包层模式的剖面图, 包含多阶包层模式; 图 4(b) 为光纤发生弯曲的示意图; 图 4(c) 为刻槽处发生微弯的示意图。当应变逐渐增大, 刻槽沿着光纤轴向发生微弯形变, 由图 4(c) 可以明显看出槽侧壁角度随着刻槽深度的增加而逐渐减小, 使刻槽进一步变形; 图 4(d) 为刻槽区域放大图, 数学表达式可表示为

$$\frac{1}{2} W = \frac{1}{2} (2\theta) (R_0 - D) = \theta \cdot (R_0 - D), \quad (11)$$

$$\sin \theta = \frac{W_A}{R_0}, \quad (12)$$

式中 W 为刻槽宽度; D 为光纤刻槽深度; θ 为槽中心线到侧壁的角度, 其范围是 0° 到 90° ; R_0 为凹槽圆弧半径; W_A 为凹槽中心区域到光纤未开槽区域的固定长度。(12) 式表示槽侧壁角度随着 θ 、 R_0 的增加而逐渐减小。将(11)和(12)式进行合并可得

$$D = \frac{W_A}{\sin \theta} - \frac{W}{2\theta}, \quad (13)$$

微弯弯曲率 C 可表示为

$$C = 1/R_0 = 1/\sqrt{W_A^2 + \theta^2}. \quad (14)$$

由此可明显得出槽侧壁角度 θ 随着 D 增加而逐渐减小, 微弯弯曲率 C 逐渐增大, 微弯程度增加。当轴

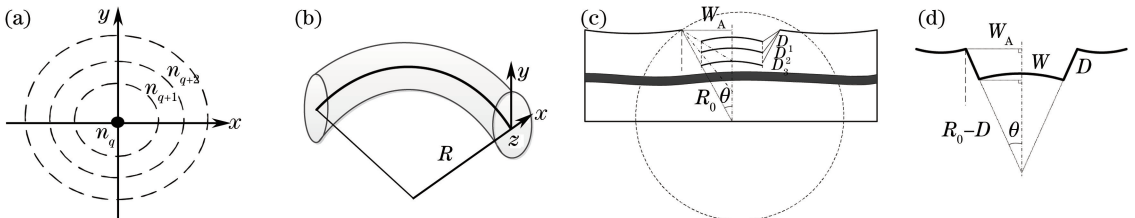


图4 刻槽型 LPFG 的微弯示意图。(a) 光纤包层模式的剖面图; (b) 光纤弯曲示意图; (c) 刻槽结构处的微弯图; (d) 微弯放大图

Fig. 4 Micro-bend schematic diagram of the grooved LPFG. (a) Cross-section view of the optical fiber cladding mode; (b) optical fiber bending diagram; (c) micro-bend figure in the groove structure; (d) enlarged view of the micro-bend area

向应变增加,刻槽变形程度增大, Δn_{groove} 增加。当槽侧壁角度 θ 接近 0° ,刻槽变形程度将达到最小值,刚好能够抵消应力测量中内部热应力产生的干扰。

3 实验结果及分析

在实验中,光纤光栅的纤芯对外界变化比较敏感,折射率调制主要体现在纤芯有效折射率的变化上。随着应变增加,微弯形变量增大,从而导致纤芯基模与包层模之间的耦合程度增加,提高 LPFG 的折射率调制,引起透射谱的谐振波长发生变化。为了研究不同刻槽深度的 LPFG 的应变传感特性,在同种单模光纤上制作不同刻槽深度的 LPFG₁、LPFG₂ ($D_1=20\ \mu\text{m}$, $D_2=2\ \mu\text{m}$)。插入损耗约为 2.8 dB, LPFG₁、LPFG₂ 的传输衰减点可以从其透射谱中观察得出 (LPFG₁、LPFG₂ 的谐振波长和谐振峰幅值分别是 $\lambda_1=1541.2\ \text{nm}$, $A_1=-38.458\ \text{dB}$; $\lambda_2=1554.2\ \text{nm}$, $A_2=-31.33\ \text{dB}$)。LPFG₁ 和 LPFG₂ 光栅的周期数为 $N=30$, 栅距为 $\Lambda=420\ \mu\text{m}$ 。

图 5 和图 6 表示刻槽型 LPFG₁、LPFG₂ 随着应变的变化,谐振波长与透射谱特性的变化。两种不同深度的刻槽型 LPFGs 谐振波长都向短波方向线性漂移。图 5 中分别对谐振波长和谐振峰幅值的实验数据点进行了线性拟合,红色曲线表示刻槽型 LPFGs 的应变从 $0\ \mu\epsilon$ 增加到 $1000\ \mu\epsilon$ 时谐振波长响应测试曲线;蓝色曲线表示谐振峰幅值随应变的变化。随着应变的增加,图 5(a) 显示刻槽型 LPFG₁ ($D_1=20\ \mu\text{m}$) 谐振波长线性蓝移 $-10.96\ \text{nm}$ 。把谐振波长漂移作为应变测试的基本点。刻槽型 LPFG₁ 曲线显示应变在 $0\sim 400\ \mu\epsilon$ 范围内时,谐振波长从 $1541.2\ \text{nm}$ 减少到 $1533.32\ \text{nm}$, 应变灵敏度为 $-19.37\ \text{pm}/\mu\epsilon$, 而无刻槽型结构的光纤光栅应变灵敏度为 $-0.45\ \text{pm}/\mu\epsilon$ 。与无刻槽的 LPFG 相比较,应变灵敏度明显提高了很多。当应变超过 $400\ \mu\epsilon$ 时谐振波长变化比较缓慢。当轴向应变在 $400\sim 1000\ \mu\epsilon$ 变化时,谐振波长从 $1533.32\ \text{nm}$ 最终变化到 $1530.24\ \text{nm}$, 这一段应变灵敏度为 $-5.12\ \text{pm}/\mu\epsilon$ 。由于弹光效应及耦合模式理论,可以知道在刻槽区域与未刻槽区域引起各折射变化不同,随着微应变的增加,刻槽区域的微弯程度逐渐增加,影响波导几何结构;折射率调制效率增加,使得光纤光栅的纤芯基模与包层模耦合效率程度提高,谐振波长线性减少的幅度加大。当应变达到 $400\ \mu\epsilon$ 时,耦合效率达到最高,灵敏度最高。继续增加应变,则模式耦合程度出现过耦合现象,所以波长幅度减少缓慢,出现明显弯折现象。当轴向应变在 $0\sim 1000\ \mu\epsilon$ 变化时,透射谱谐振峰幅值对轴向应变不敏感,仅从 $-38.458\ \text{dB}$ 增加到 $-39.548\ \text{dB}$ 。图 5(b) 显示刻槽型 LPFG₂ ($D_2=2\ \mu\text{m}$) 应变灵敏度为 $-1.54\ \text{pm}/\mu\epsilon$, 透射谱谐振峰幅值对轴向应变的变化不敏感。图 6 为刻槽型 LPFG₁ 和 LPFG₂ 透射谱随轴向应变的变化图。随着轴向应变的增加,由于光纤的突然变形,光纤微弯位移量进一步增大,刻槽型 LPFG 凹槽区域是压力中心区域。因此,光纤纤芯到包层之间的耦合模式会随着应变的增加而逐渐增强,改变了刻槽型 LPFG 的传输衰减谱特性。

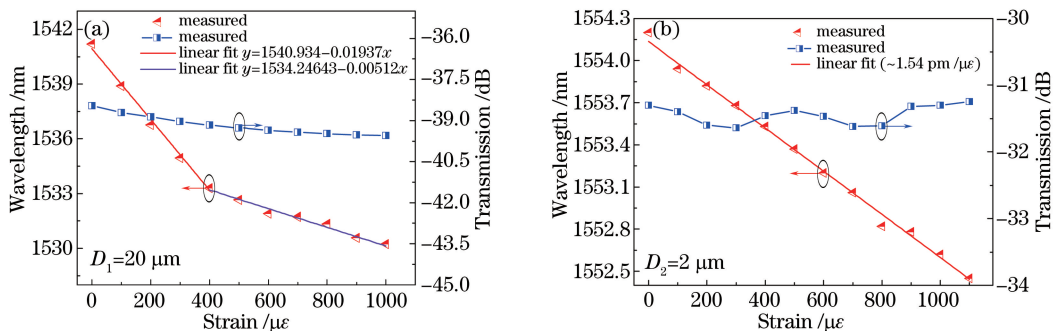


图 5 刻槽型 LPFG 谐振波长及透射谱随轴向应变的变化。(a) LPFG₁; (b) LPFG₂

Fig. 5 Resonant wavelength and transmission of the grooved LPFG versus axial strain. (a) LPFG₁; (b) LPFG₂

从图 5 和图 6 中可以看出,随着刻槽深度的增加,两个刻槽型 LPFGs 谐振波长都近似线性减少。但是,只有刻槽型 LPFG₁ ($D_1=20\ \mu\text{m}$) 的变化最快,效果最明显,也最灵敏。实验表明光纤轴向应变灵敏度与周期性刻槽深度及刻槽结构的微弯程度(应变)密切相关,因此可以作为高灵敏度的光纤应变传感器。

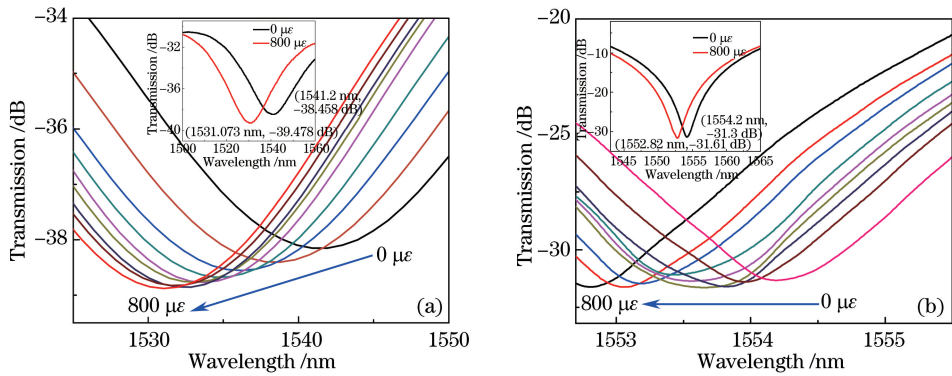


图 6 刻槽型 LPFG 的透射谱随着轴向应变的变化(插图是 $0 \mu\epsilon$ 和 $800 \mu\epsilon$ 时的透射谱)。(a) LPFG₁; (b) LPFG₂

Fig. 6 Transmission spectra of the grooved LPFG₁ versus the axial strain (The insert drawings are the transmission spectra of the strain at $0 \mu\epsilon$ and $800 \mu\epsilon$). (a) LPFG₁; (b) LPFG₂

4 讨 论

通过第 3 节分析可以知道,由于光纤表面具有非对称的周期性刻槽结构,随着刻槽深度的增加,光纤的突然变形,光纤横向微弯位移量进一步增大,LPFG 刻槽区域是应力中心区域。本文选取了不同刻槽深度的光纤进行分析,结果表明:当轴向应变增加时,没有刻槽的光纤或者对称型刻槽光纤对其不敏感,主要是因为光被稳定地约束在高折射率包层中。而当刻槽深度为 $20 \mu\text{m}$,作用轴向应变时,刻槽发生横向微弯,这主要是因为普通单模光纤进行了周期性深刻槽之后,这种周期性深刻槽会影响波导几何结构,从而导致光纤包层中传输的光通过刻槽发生折射率变化。

当轴向应变作用于刻槽型 LPFG 上时,通过应变分布来定性分析刻槽型 LPFG 的应变传感特性。为了更好地阐释这种情况,采用了一种 ANSYS 三维仿真模型分析光纤应变传感的特性,如图 7 所示。周期性刻槽光纤栅距为 $420 \mu\text{m}$,刻槽宽度为 $50 \mu\text{m}$,刻槽深度为 $2 \mu\text{m}$ 及 $20 \mu\text{m}$ 。当施加一定应变时,图 7(a)~(c) 分别表示 LPFG₂ ($D_2 = 2 \mu\text{m}$) 三维视图中槽区域的应变分布位移轮廓图、俯视图及横向视图,(d)~(f) 分别表示 LPFG₁ ($D_1 = 20 \mu\text{m}$) 的应变分布位移轮廓图、俯视图及横向视图。三维仿真参数如下:杨氏模量为 72.5 GPa ,泊松比为 0.17 ,硅密度为 2700 kg/m^3 。图示中彩色为应变的量级,红色表示应变分布最大,蓝色表示应变分布最小。随着应变量级的增加,刻槽区域为主要的应力集中区,横向微弯程度逐渐增加,物理形变使得光纤纤芯基模和包层模有效折射率程度增加,耦合程度增加,但是深刻槽比浅刻槽的微弯形变量更大,耦合程度更高。模拟应变量为 400 时,达到最大耦合程度,与实验相吻合。通过图 7 分析可得,刻槽中心位置轴向应变值最大,折射率变化也最大。深刻槽对光栅纤芯引起折射率变化的影响非常大。当应变增加

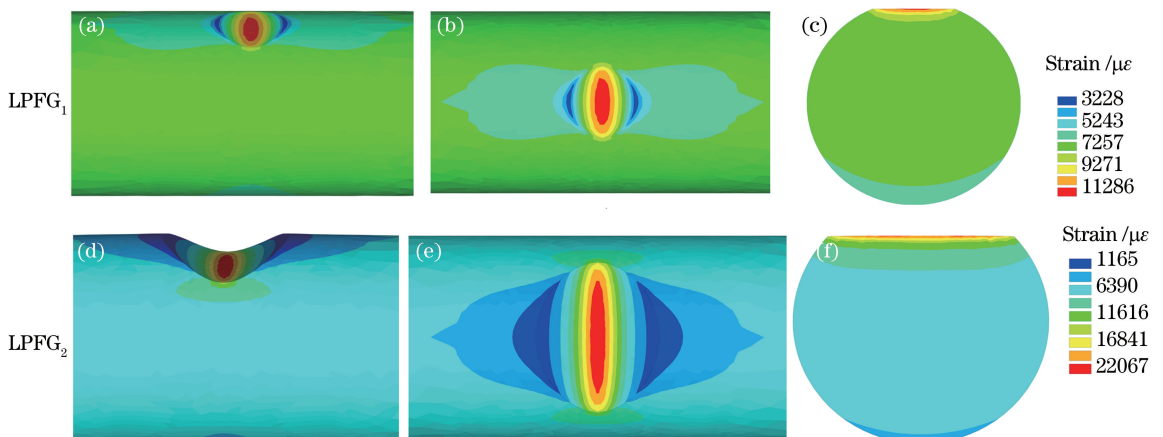


图 7 刻槽型 LPFG₁、LPFG₂ 的区域的应变分布图。(a)(d) 轮廓图;(b)(e) 俯视图;(c)(f) 横向视图

Fig. 7 Strain distributions of the grooved LPFG₁, LPFG₂. (a)(d) Profile; (b)(e) top view; (c)(f) lateral view

时,可以明显观察到光纤横向微弯程度逐渐增加,刻槽区域的物理形变使得光纤纤芯基模和包层模有效折射率都逐渐减小。根据弹光效应可知,光纤包层模的有效折射率变化更大,因此谐振波长会向短波方向漂移。

5 结 论

采用实验测试和模拟仿真相结合的方法,利用优化改进的 CO₂ 激光器对光纤实行点对点加热方式,制备周期性刻槽 LPFG,并对其应变传感特性进行分析。结果表明:不同刻槽深度的 LPFG 光透射谱的谐振波长都近似线性地向短波方向漂移,深刻槽的 LPFG₁ 在 0~400 $\mu\epsilon$ 漂移幅度比较大,最大灵敏度可达 -19.37 pm/ $\mu\epsilon$,比普通单模光纤提高至少一个数量级。应变灵敏度主要是由轴向应变及微弯形变量引起,但对衰减幅值影响较小。相比其他干涉型或者短周期型光栅应变传感器,这里提出的基于刻槽型 LPFG 的应变传感测试系统灵敏度高、结构简单,易于搭建且便于实现微型化。因此,这种刻槽型 LPFG 具有更多工程应用价值。

参 考 文 献

- 1 Huang W Z, Zhang W T, Zhen T K, *et al.* A cross-correlation method in wavelet domain for demodulation of FBG-FP static-strain sensors[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(16): 1597-1600.
- 2 Liu Y, Liu C, Xiang G L, *et al.* Scheme of optical fiber temperature sensor employing deep-grooved process optimization [J]. Photonic Sensors, 2015, 5(1): 6-11.
- 3 Huang Y, Zhou Z, Zhang Y, *et al.* A temperature self-compensated LPFG sensor for large strain measurements at high temperature[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2010, 59(11): 2997-3004.
- 4 Wang J, Peng G, Hu Z, *et al.* Design and analysis of a high sensitivity FBG accelerometer based on local strain amplification[J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(10): 5442-5449.
- 5 Tang J, Yin G, Liu S, *et al.* Gas pressure sensor based on CO₂-laser-induced long-period fiber grating in air-core photonic bandgap fiber[J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(5): 1-7.
- 6 Zhu Tao, Rao Yunjiang, Mo Qiuju. A high sensitivity fiber-optic torsion sensor based on a novel ultra long-period fiber grating[J]. Acta Physica Sinica, 2006, 55(1): 249-253.
朱 涛, 饶云江, 莫秋菊. 基于超长周期光纤光栅的高灵敏度扭曲传感器[J]. 物理学报, 2006, 55(1): 249-253.
- 7 Song Zhiqiang, Qi Haifeng, Wang Chang, *et al.* Experimental research of thermal effect in FBGs fabrication[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(12): 120602.
宋志强, 祁海峰, 王 昌, 等. 光纤布拉格光栅制作中热效应影响的实验研究[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(12): 120602.
- 8 Zhang Xin, Yang Zhi, Li Qianglong, *et al.* Research on temperature tuning properties of chirped fiber grating[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(5): 0505002.
张 新, 杨 直, 李强龙, 等. 啁啾光纤光栅的温度调谐特性研究[J]. 光学学报, 2016, 36(5): 0505002.
- 9 Qian Chunlin, Chen Mingyang. Investigation on refractive index sensing based on interference effect in multimode optical fiber[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 53(5): 050601.
钱春霖, 陈明阳. 基于多模干涉效应的光纤折射率传感技术研究[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 53(5): 050601.
- 10 Rao Y J, Wang Y P, Ran Z L, *et al.* Novel fiber-optic sensors based on long-period fiber gratings written by high-frequency CO₂ laser pulses[J]. Journal of Lightwave Technology, 2003, 21(5): 1320-1327.
- 11 Zhong X, Wang Y, Qu J, *et al.* High-sensitivity strain sensor based on inflated long period fiber grating[J]. Optics Letters, 2014, 39(18): 5463-5466.
- 12 Wang Y P, Rao Y J. A novel long period fiber grating sensor measuring curvature and determining bend-direction simultaneously[J]. IEEE Sensors Journal, 2005, 5(5): 839-843.
- 13 Huang W, Zhang W, Zhen T, *et al.* π -phase-shifted FBG for high-resolution static-strain measurement based on wavelet threshold denoising algorithm[J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(22): 3692-3698.
- 14 Shen Haowen, Zhu Pingyu, Xu Peisheng, *et al.* Stain transfer factor analysis of basal grooving encapsulating fiber Bragg grating sensor[J]. Instrument Technique and Sensor, 2015(2): 96-99.
申昊文, 朱萍玉, 许沛胜, 等. 基底刻槽封装式光纤光栅传感器应变传递影响因素分析[J]. 仪表技术与传感器, 2015 (2): 96-99.
- 15 Lin C Y, Wang L A, Chern G W. Corrugated long-period fiber gratings as strain, torsion, and bending sensors[J]. Journal of Lightwave Technology, 2001, 19(8): 1159-1168.