

激光与光电子学进展

基于 CO₂ 激光技术的双峰谐振长周期光纤光栅
折射率传感器赵爽¹, 杜超^{1,3*}, 王秋雨¹, 贾斌¹, 张丽¹, 崔丽琴¹, 邓霄^{1,2**}¹太原理工大学物理与光电工程学院, 山西 太原 030024;²太原理工大学新型传感器与智能控制教育部和山西省重点实验室, 山西 太原 030024;³山西大学量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西 太原 030006

摘要 为了探索一种高灵敏折射率传感器, 基于 CO₂ 激光技术制备出双峰谐振长周期光纤光栅 (LPFG)。首先, 利用 CO₂ 激光器在腐蚀包层后的传统单模光纤和 80 μm 弯曲不敏感光纤上制备出周期分别为 196 μm 和 73 μm 的双峰谐振 LPFG, 证明了采用 CO₂ 激光微加工技术在单模光纤上制备短周期 LPFG 的可能性。其次, 利用 CO₂ 激光器直接在 2 种 80 μm 单模光纤上制备出周期分别为 110 μm 和 115 μm 的双峰谐振 LPFG。实验结果表明: 在 2 种 80 μm 单模光纤上制备的 LPFG 具有谐振损耗大, 插入损耗小和折射率灵敏度高等优点。基于以上优点, 采用 CO₂ 激光技术制备的双峰谐振 LPFG 在生物、化学及环境参数检测等重要领域的应用具有较大潜力。同时, 也提供了一种操作简单、低成本制备双峰谐振 LPFG 的方法。

关键词 光纤光学; 长周期光纤光栅; 双峰谐振; CO₂ 激光技术; 折射率

中图分类号 TN253

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP223219

Dual-Peak Resonance Long-Period Fiber Grating Refractive Index
Sensor Based on CO₂ Laser TechnologyZhao Shuang¹, Du Chao^{1,3*}, Wang Qiuyu¹, Jia Bin¹, Zhang Li¹, Cui Liqin¹, Deng Xiao^{1,2**}¹College of Physics and Optoelectronics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China;²Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control System, Ministry of Education and Shanxi, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China;³State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Shanxi University, Taiyuan 030006, Shanxi, China

Abstract A dual-peak resonance long-period fiber grating (LPFG) based on CO₂ laser technology is proposed to investigate a highly sensitive refractive index sensor. First, dual-peak resonance LPFGs with grating periods of 196 and 73 μm are fabricated in conventional single-mode fiber and 80 μm bend-insensitive single-mode fiber, respectively, using a CO₂ laser after etching cladding. This demonstrates the possibility of fabricating an LPFG on a single-mode fiber with a shorter grating period using CO₂ laser micromachining technology. Dual-peak resonance LPFGs with grating periods of 110 and 115 μm are directly fabricated in two 80 μm single-mode fibers using a CO₂ laser. The results show that the dual-peak resonance LPFGs fabricated in two 80 μm thin single-mode fibers exhibit advantages of deep attenuation loss, low loss, and high refractive index sensitivity. Based on its excellent performance, the dual-peak resonance LPFG based on CO₂ laser technology is a prospective sensor applicable to fields such as biological, chemical, and environmental parameter detection. In addition, a simple-operation low-cost method for fabricating dual-peak resonance LPFGs is proposed.

Key words fiber optics; long period fiber grating; dual-peak resonance; CO₂ laser technology; refractive index

收稿日期: 2022-11-30; 修回日期: 2022-12-05; 录用日期: 2022-12-12; 网络首发日期: 2023-01-05

基金项目: 国家自然科学基金(62203320, 52009088)、中国博士后科学基金面上项目(2019M661063)、量子光学与光量子器件国家重点实验室开放课题(KF202210)、山西省科技厅面上青年基金(201901D211073)、山西省社会发展重点研发计划(201903D321001)、山西省高等学校科技创新项目(2019L0198)

通信作者: *duchao@tyut.edu.cn; **dengxiao@tyut.edu.cn

1 引言

光纤光栅具有抗电磁干扰、耐腐蚀、高灵敏度、快速响应、易解调等优点,在传感领域得到广泛应用^[1-4]。自 1996 年首个长周期光纤光栅(LPFG)问世以来,关于 LPFG 的研究引起众多学者的关注^[5]。LPFG 对外界折射率变化敏感,故基于 LPFG 的折射率传感器成为被研究最多的光纤传感器件之一^[6-8]。然而,基于传统单模光纤(SMF)的 LPFG 折射率传感器灵敏度只有几十 nm/RIU(折射率单元),仍然无法满足实际测量需求。目前,提高 LPFG 灵敏度的方法主要包括包层直径减小,双峰谐振效应和模式转换效应。2015 年,Del Villar^[9]在理论上证明了 3 种方法结合可以获得 1.43×10^5 nm/RIU 的高折射率灵敏度,而在提高灵敏度的实际工作中,单一方法提高折射率灵敏度的效果较为有限。因此,研究人员通常结合 2 种或 3 种方法来提高 LPFG 的折射率灵敏度。2016 年,Del Villar 等^[10]通过腐蚀 LPFG 的包层使 LP_{0,3} 包层模式激发出双峰谐振效应,在 1.333~1.393 的折射率范围内实现了 8734 nm/RIU 的折射率灵敏度。之后,Dey 等^[11]通过腐蚀 LPFG 的包层使 LP_{0,2} 包层模式激发出双峰谐振效应,在 1.3330~1.3335 的折射率范围内折射率灵敏度达到 8751 nm/RIU。但是这 2 种传感器的包层直径分别仅有 34.86 μm 和 21.87 μm,在实际测量中容易折断。2019 年,Zou 等^[12]通过在双峰谐振 LPFG 表面涂覆高折射率纳米薄膜激发模式转换效应,最终在 1.3360~1.3397 的折射率范围内使其折射率灵敏度达到 1×10^4 nm/RIU。然而,模式转换效应对纳米膜的厚度和均匀度要求较高,且操作步骤复杂。所以,双峰谐振效应是在实践中提高 LPFG 折射率灵敏度较为有效的方法。

目前,制备双峰谐振 LPFG 的方法主要有飞秒激光法^[13-14]、紫外曝光法^[15-16]、电弧法^[17-18]。其中,紫外曝光法和飞秒激光法是制备双峰谐振 LPFG 最有效的方法。然而,上述 2 种方法操作复杂,所需设备价格昂贵、不具备普遍适用性。为了探索一种低成本制备双峰谐振 LPFG 的方法,Colaço 等^[19]利用电弧放电技术制备了周期为 150 μm 的双峰谐振 LPFG。然而,该方法操作复杂、精度较低,且受限于电弧宽度而无法制备更小周期的 LPFG。2000 年,饶云江^[20]利用计算机控制 CO₂ 激光器制备出较高质量的 LPFG。此后,CO₂ 激光技术因其操作简单、成本低廉和适用性普遍而被广泛应用于 LPFG 的制备中,但采用 CO₂ 激光技术制备双峰谐振 LPFG 却鲜有研究。为了探索利用 CO₂ 激光技术制备双峰谐振 LPFG 的可能性,本文分别在 4 种 SMF 上进行实验验证,从而打破 CO₂ 激光器在实践中难以制备双峰谐振 LPFG 的局限。此外,基于 2 种细 SMF 制备的双峰谐振 LPFG 具有良好的折射率传感特性和较大的谐振损耗,在生物、化学及环境参数检测等重要领域具有广泛的应用前景。

2 基本原理

LPFG 的基本原理是耦合模式理论。在理想状态下,光纤内相互正交的模式受到外界环境干扰后不再正交,不同模式之间发生耦合而形成光栅^[21]。此时,连续光在 LPFG 中传播,特定波长的光被耦合到包层中从而形成损耗峰,该波长即 LPFG 的谐振波长 λ , λ 可表示为

$$\lambda = (n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{eff}}^{\text{cl}}) \Lambda, \quad (1)$$

式中: $n_{\text{eff}}^{\text{co}}$ 和 $n_{\text{eff}}^{\text{cl}}$ 分别为纤芯和包层的有效折射率; Λ 为 LPFG 的周期。当光栅确定后,纤芯的有效折射率 $n_{\text{eff}}^{\text{co}}$ 基本不再变化,且与外部环境折射率无关。然而,包层的有效折射率 $n_{\text{eff}}^{\text{cl}}$ 不仅与纤芯、包层的直径和折射率有关,还与外部环境的折射率有关。因此,当光栅确定后, $n_{\text{eff}}^{\text{cl}}$ 仅与外部环境折射率有关。LPFG 的折射率灵敏度与包层模式的阶次有关。包层模式的阶次越高,越容易耦合出双峰谐振 LPFG,且双峰的间距越小,即双峰的位置越接近色散转折点,折射率灵敏度越高。双峰谐振 LPFG 的制备难度主要为所需包层模式阶次较高,相应光栅周期较小,一般方法无法制备小周期的 LPFG。

在 CO₂ 激光器制备双峰谐振 LPFG 的过程中,周期、光栅深度和宽度是形成光栅的重要参数。根据 CO₂ 激光器(CO₂-H10C, 大族激光)的技术手册,激光器的光斑小于 100 μm,且激光光斑的大小会随着激光器功率的增大而增大。CO₂ 激光制备 LPFG 的结构示意图如图 1 所示,图 1 中: Λ 和 D_1 分别为光栅周期和光栅之间的距离、 D_2 和 D_3 为光栅深度、 D_4 和 D_5 为光栅宽度。激光器功率增加会使光栅宽度和深度增大。当激光器功率较大、光栅周期较小时,相邻光栅重叠则无法耦合形成 LPFG。此外,较小的包层直径使包层模式与纤芯模式更容易耦合出周期较小的 LPFG,原因是较小的包层直径所需光栅深度和宽度较小,从而减小 CO₂ 激光器的最小制备周期。因此,利用 CO₂ 激光器制备双峰谐振 LPFG 的关键是选择合适的光栅周期、激光器功率和光纤包层直径。

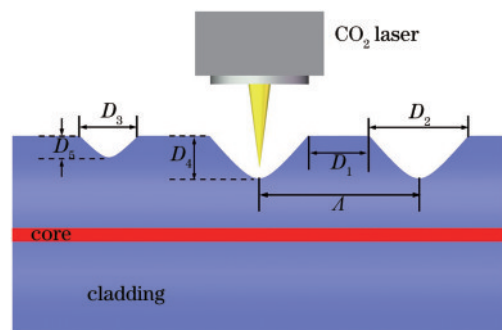


图 1 CO₂ 激光器制备的 LPFG 示意图

Fig. 1 Schematic diagram of LPFG fabricated by CO₂ laser

3 仿真分析

折射率传感器的设计依赖于 LPFG 的折射率传感

特性,因此折射率灵敏度是关键指标。为了探索 CO₂ 激光器制备双峰谐振 LPFG 的通用性,在传统 SMF (SMF-28,康宁)、弯曲不敏感 SMF (BI 15-80-U16,长盈通)、细 SMF I 和细 SMF II (SMF13-2(21111)-3B-1、SMF13-2(21111)-3B-2,中国电子科技集团公司第四十六研究所)的基础上建立了 LPFG 仿真模型,其参

数如表 1 所示。弯曲不敏感 SMF 为双包层结构,表中分别列出两层包层的直径和折射率。此外,CO₂ 激光器单侧打标使 LPFG 的耦合模式为非对称模式。利用 COMSOL 仿真软件分别仿真分析基于 4 种光纤的 LPFG 传感特性。

表 1 SMF 的参数

Table 1 Parameters of SMF

Fiber	Cladding diameter / μm	Core diameter / μm	Cladding refractive index	Core refractive index
Conventional SMF	125	8.2	1.4628	1.4681
Bend insensitive SMF	80/19.3	6.4	1.45766/1.4572	1.47021
Thin SMF I	80	5.6	1.457	1.469
Thin SMF II	80	5.2	1.460	1.471

基于传统 SMF 制备的 LPFG 相位匹配曲线如图 2(a)所示,随着包层模式阶次增加,相位匹配曲线斜率增大。在波长范围 1100~1800 nm 内,非对称包层模式增加到 LP_{1,10} 发生双峰谐振效应,此时光栅周期为 205.47 μm 。根据 CO₂ 激光器的精度,可以直接制备大于 100 μm 周期的 LPFG。然而,LP_{1,10} 的耦合系数较小,增加了 LPFG 的制备难度。此外,传统 SMF 的包层直径较大,只有深的光栅深度才能使纤芯模式与包层模式耦合。对特定的光栅周期而言,较小的包层直径会降低包层模式的阶次,还会增加包层模式的耦

合系数。因此,为了制备双峰谐振 LPFG,需要减小传统 SMF 的包层直径。弯曲不敏感 SMF 的 LPFG 相位匹配曲线如图 2(b)所示,当非对称模式增加到 LP_{1,10} 时发生双峰谐振效应,此时光纤周期为 80 μm 。根据 CO₂ 激光器的制备精度,周期小于 100 μm 的 LPFG 需通过减小激光器功率来减小激光光斑,进而减小 CO₂ 激光器的最小制备周期。因此,制备双峰谐振 LPFG 也需减小弯曲不敏感 SMF 的包层直径。

基于细 SMF I 和细 SMF II 制备的 LPFG 相位匹配曲线如图 3 所示。由图 3 可知,基于这 2 种光纤的

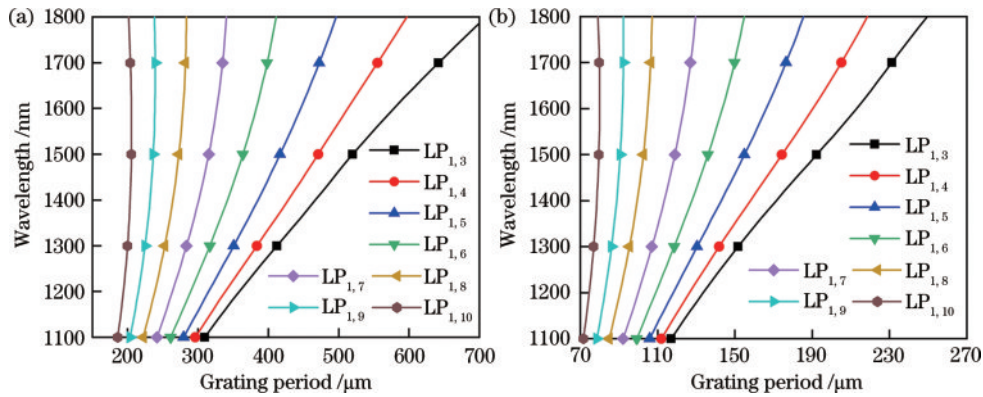


图 2 LPFG 的相位匹配曲线。(a)传统 SMF;(b)弯曲不敏感 SMF

Fig. 2 Phase matching curves of LPFG: (a) Conventional SMF; (b) bend insensitive SMF

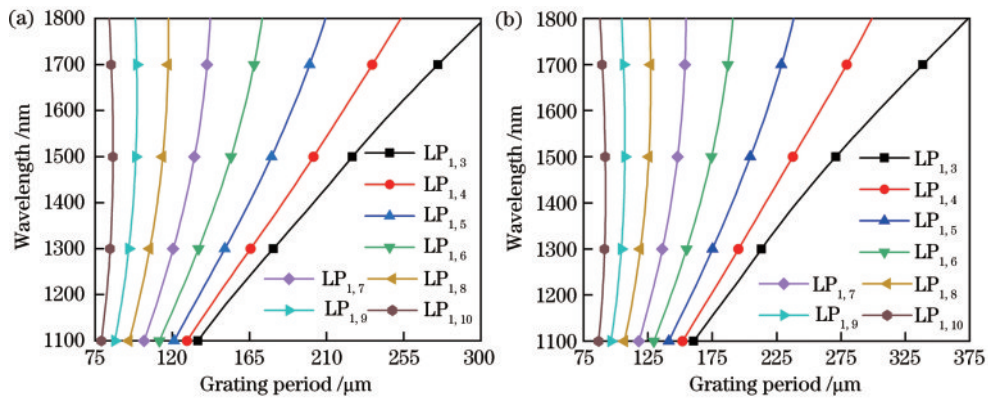


图 3 LPFG 的相位匹配曲线。(a)细 SMF I;(b)细 SMF II

Fig. 3 Phase matching curves of LPFG: (a) Thin SMF I; (b) thin SMF II

LPFG 在波长范围 1100~1800 nm 内,非对称包层模式增加到 $LP_{1,8}$ 、 $LP_{1,9}$ 和 $LP_{1,10}$,均会发生双峰谐振效应。与传统 SMF 和弯曲不敏感 SMF 不同,细 SMF I 和细 SMF II 制备的包层直径较小,而且耦合包层模式 $LP_{1,8}$ 和 $LP_{1,9}$ 所需光栅周期大于 100 μm 。因此,在不腐蚀包层直径的情况下, CO_2 激光器可以直接在细 SMF I 和细 SMF II 上制备双峰谐振 LPFG。然而,根据 LPFG 耦合系数特性^[22],包层模式偶阶次的耦合系数小于奇阶次的耦合系数,因此后续研究将基于包层模式 $LP_{1,9}$ 制备双峰谐振 LPFG。

4 实验与结果分析

CO_2 激光制备 LPFG 的原理相对复杂,一般认为主要有残余应力释放、局部刻蚀、熔融变形和密度变化等原因^[23]。 CO_2 激光器(额定功率为 10 W)制备 LPFG 的实验装置如图 4 所示,其中超连续谱光源(SC-5)与光谱仪(AQ6370D)通过光纤连接,形成一个完整的回路。光纤夹具和滑轮被放置在光源和光谱仪之间。在滑轮一端的光纤上加装砝码,在提高成栅质量与效率的同时,可以使 LPFG 在制备过程中始终保持拉直状态,更大程度地释放残余应力。通过计算机控制 CO_2 激光器,选择合适的激光功率和光栅周期。在制备 LPFG 的过程中,采用光谱仪实时监测透射光谱的变化。

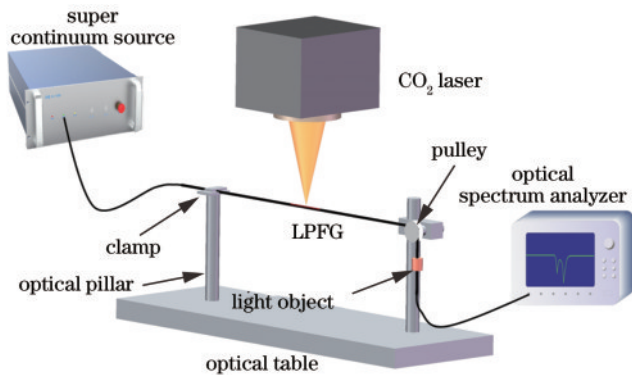


图 4 CO_2 激光器制备 LPFG 的实验装置

Fig. 4 Experimental device of CO_2 laser fabricating LPFG

根据技术手册, CO_2 激光器的误差约为 1 μm ,因此打标周期选用 1 次,以确保光栅的质量。在制备 LPFG 的过程中,XY 振镜及驱动器组成的系统用于激光的高精度扫描和精密定位。此外,为了简化制备过程,将激光器的打标速度、空跳速度、Q 频分别设置为 30 mm/s、1000 mm/s、20 kHz,并将激光开延时、激光关延时、跳转延时、拐弯延时、层延时分别设置为 100、100、300、10、1000 μs 。利用软件绘制不同周期的模板,并改变激光器功率精确控制曝光能量的大小,以制备所需的 LPFG。

4.1 传统 SMF

为了在传统 SMF 上制备双峰谐振 LPFG,需采用

氢氟酸腐蚀光纤包层。首先,用质量分数为 40% 的氢氟酸溶液腐蚀包层 25 min。然后,利用计算机控制 CO_2 激光器,选用 16% 的激光功率制备光栅周期为 196 μm 的 LPFG。LPFG 在电子显微镜下的实物图如图 5 所示,包层直径从 125 μm 减小到 68.45 μm ,对应包层模式从 $LP_{1,10}$ 减小到 $LP_{1,6}$ 。值得注意的是,当激光功率小于 17% 时,光纤表面不再出现可视的光栅槽。此时,由于激光的热效应,纤芯和包层的折射率仍可发生变化,从而发生模式耦合。

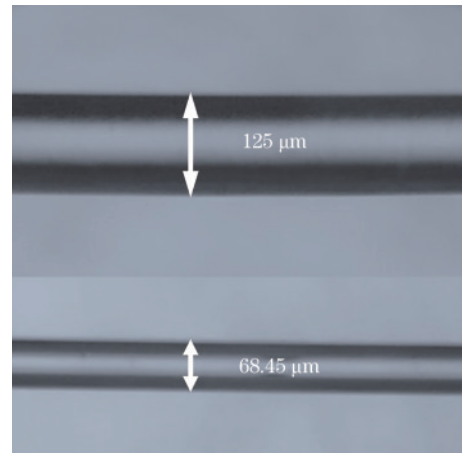


图 5 腐蚀后的 LPFG 电子显微镜图

Fig. 5 Physical diagram of etched LPFG under the electron microscope

在双峰谐振 LPFG 的折射率传感特性实验研究中,采用水和甘油混合物作为折射率溶液。当折射率从 1.33222 增大到 1.39018 时,基于传统 SMF 制备的双峰谐振 LPFG 的透射光谱如图 6(a) 所示,由于谐振损耗小,所以无法继续靠近色散转折点。建立包层直径为 72.4 μm 的仿真模型,仿真光栅周期选择 196 μm 。谐振波长与折射率的关系如图 6(b) 所示,双峰谐振 LPFG 的左峰和右峰灵敏度 $K_{E,1}$ 、 $K_{E,2}$ 分别为 -487.676 nm/RIU 和 870.461 nm/RIU。由图 6 可知,实验与理论结果的变化趋势基本一致。该结果与文献[19]相似,基于传统 SMF 制备的双峰谐振 LPFG 的折射率灵敏度得到提高,但谐振损耗约为 1 dB,无法在实际中应用。

4.2 弯曲不敏感 SMF

为了减小 CO_2 激光器的最小制备周期,需采用氢氟酸腐蚀光纤包层。首先,采用 40% 的氢氟酸溶液腐蚀光纤包层 20 min。然后,用计算机编程控制 CO_2 激光器的激光功率为总功率的 5%,光栅制备周期为 73 μm 。制备好的 LPFG 在电子显微镜下的实物图如图 7 所示,包层直径从 80 μm 减小到 40 μm ,对应包层模式从 $LP_{1,10}$ 减小到 $LP_{1,5}$ 。

当折射率从 1.33222 增大到 1.39018 时,基于弯曲不敏感 SMF 制备的双峰谐振 LPFG 的透射光谱如图 8(a) 所示。由于 LPFG 的谐振损耗大,所以更容易

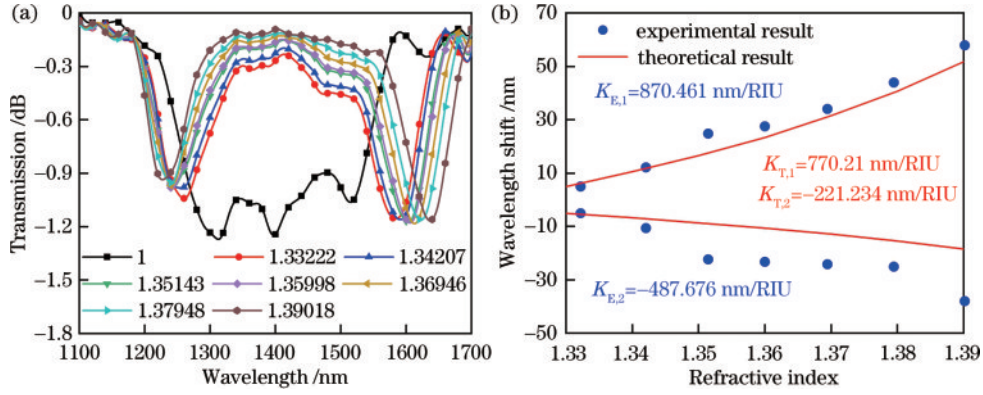


图 6 基于传统 SMF 的 LPFG 折射率响应特性。(a) 腐蚀后的 LPFG 透射光谱在不同折射率下的变化; (b) 谐振波长与折射率变化之间的关系

Fig. 6 Refractive index response of LPFG based on conventional SMF. (a) Transmission spectra of etched LPFG under different refractive indexes; (b) relationship between resonance wavelength and refractive index variations

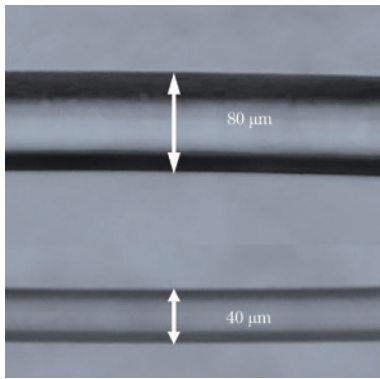


图 7 腐蚀后的 LPFG 电子显微镜图

Fig. 7 Physical diagram of etched LPFG under the electron microscope

通过调控双峰谐振 LPFG 接近色散转折点来提高折射率灵敏度。建立包层直径为 $37\ \mu\text{m}$ 、包层模式为 $LP_{1,5}$ 的仿真模型, 仿真光栅周期选择 $73\ \mu\text{m}$ 。谐振波长与折射率的关系如图 8(b) 所示, 双峰谐振 LPFG 左峰和右峰的灵敏度分别为 $-1993.298\ \text{nm/RIU}$ 和 $3270.027\ \text{nm/RIU}$ 。

由图 8 可知, 实验与理论结果变化趋势一致, 且折射率灵敏度大小与理论结果基本相符。所以, 基于弯曲不敏感 SMF 制备的双峰谐振 LPFG 具有超高的折射率灵敏度, 且谐振损耗大于 $20\ \text{dB}$, 但该光纤的包层直径为 $40\ \mu\text{m}$, 在实际应用过程中容易折断。因此, 需要寻求一种不腐蚀包层即可制备出双峰谐振 LPFG 的光纤。

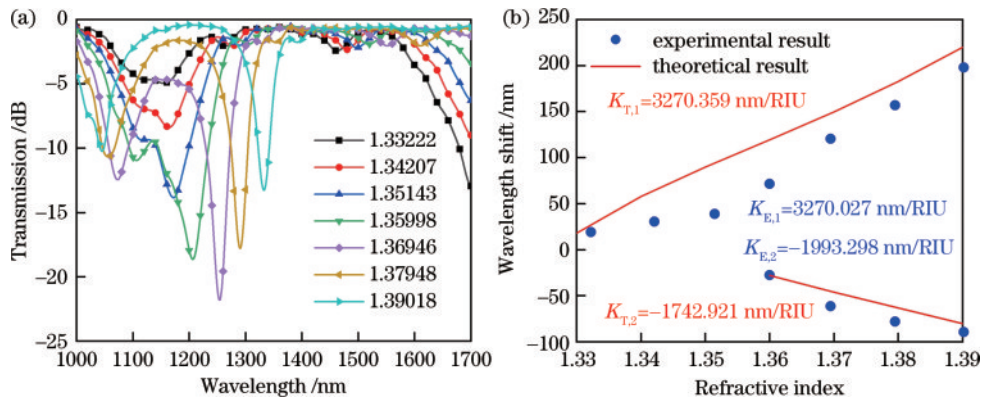


图 8 基于弯曲不敏感 SMF 的 LPFG 折射率响应特性。(a) LPFG 透射光谱在不同折射率下的变化; (b) 谐振波长与折射率变化的关系

Fig. 8 Refractive index response of LPFG based on bend insensitive SMF. (a) Transmission spectra of LPFG under different refractive indexes; (b) relationship between resonance wavelength and refractive index variations

4.3 细 SMF I

根据 LPFG 的耦合系数特性, 为了制备更高质量的双峰谐振 LPFG, 选择 $LP_{1,9}$ 作为参与耦合的包层模式。在不腐蚀包层直径的情况下, 利用计算机控制 CO_2 激光器, 选用 20% 的激光功率制备周期为 $110\ \mu\text{m}$ 的双峰谐振 LPFG。当折射率变化范围为 $1.33222\sim$

1.39018 时, 基于细 SMF I 制备的 LPFG 透射光谱如图 9(a) 所示, 其谐振损耗大于 $10\ \text{dB}$, 且插入损耗小。

为了比较理论与实验结果的差异, 建立包层直径为 $80\ \mu\text{m}$ 、包层模式为 $LP_{1,9}$ 的仿真模型, 仿真光栅周期选择 $98.25\ \mu\text{m}$ 。谐振波长与折射率的关系如图 9(b) 所示, 双峰谐振 LPFG 左峰和右峰的灵敏度分别

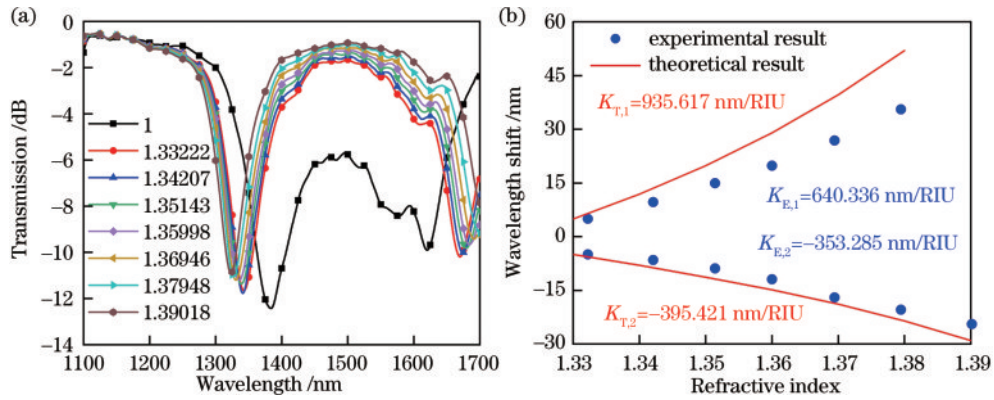


图9 基于细SMF I的LPFG折射率响应特性。(a)LPFG透射光谱在不同折射率下的变化;(b)谐振波长与折射率变化的关系
Fig. 9 Refractive index response of LPFG based on thin SMF I. (a) Transmission spectra of LPFG under different refractive indexes; (b) relationship between resonance wavelength and refractive index variations

为 -353.285 nm/RIU 和 640.336 nm/RIU ,该结果略小于理论结果。根据 CO_2 激光器的技术手册,光栅周期的精度约为 $1 \mu\text{m}$ 。双峰谐振LPFG的灵敏度对光栅周期的变化更为敏感,当周期变化 $1 \mu\text{m}$ 时,灵敏度变化较大,使实验结果与理论结果相比偏差较大。与其他制备双峰谐振LPFG的方法相比,采用 CO_2 激光技术在细SMF I上制备的双峰谐振LPFG具有较大的谐振损耗,且具有良好的线性度和折射率传感特性。

4.4 细SMF II

为了进一步验证 CO_2 激光器制备双峰谐振LPFG的通用性,选择与细SMF I相似的细SMF II,利用计算机控制 CO_2 激光器,选用相同的制备参数制备周期为 $115 \mu\text{m}$ 的双峰谐振LPFG,其参与耦合的包层模式为 $\text{LP}_{1,0}$ 。当折射率范围为 $1.33222 \sim 1.39018$ 时,基于细SMF II制备的LPFG透射光谱如图10(a)所示,其谐振损耗大于 20 dB ,且插入损耗小。

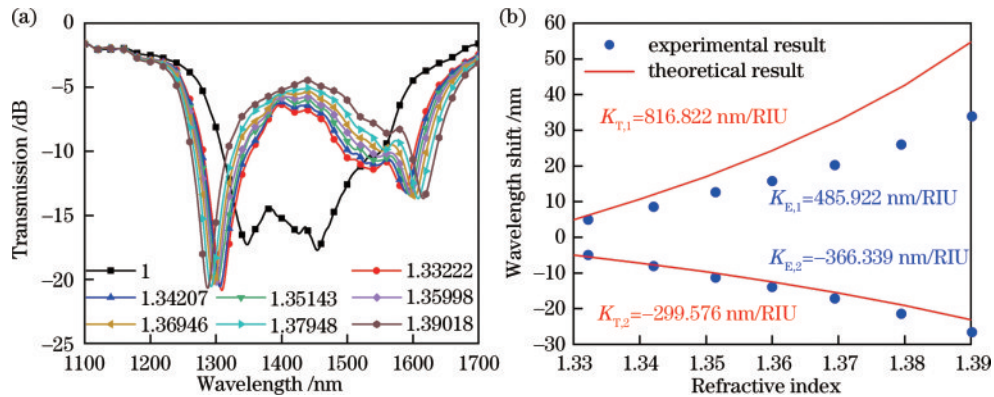


图10 基于细SMF II的LPFG折射率响应特性。(a)LPFG透射光谱在不同折射率下的变化;(b)谐振波长与折射率变化的关系
Fig. 10 Refractive index response of LPFG thin SMF II. (a) Transmission spectra of LPFG under different refractive indexes; (b) relationship between resonance wavelength and refractive index variations

建立与细SMF I相似的仿真模型,仿真光栅周期选择 $105.5 \mu\text{m}$ 。谐振波长与折射率的关系如图10(b)所示,双峰谐振左峰和右峰的灵敏度分别为 -366.339 nm/RIU 和 485.922 nm/RIU ,该结果小于理论结果。相似地,当周期变化为 $1 \mu\text{m}$ 时,灵敏度变化较大。总体来说,实验结果在误差允许范围内。与基于细SMF I制备的双峰谐振LPFG相比,基于细SMF II制备的双峰谐振LPFG对折射率具有良好的线性响应度和传感特性,且具有更大的谐振损耗。

综上所述,基于4种SMF制备的双峰谐振LPFG均具有良好的折射率传感特性。其中,传统SMF和弯曲不敏感SMF包层腐蚀后才能制备出双峰谐振LPFG,在实际应用过程中,直径较小的光纤包层容易

被折断。相反,2种细SMF无需腐蚀包层即可制备双峰谐振LPFG,故其在实际测量过程中有较稳定的结构。特别地,较大的谐振损耗和较小的插入损耗使其便于后续优化和应用。因此,基于2种细SMF制备的双峰谐振LPFG的折射率传感器具有广阔的应用前景。

4 结 论

提出了基于 CO_2 激光技术制备双峰谐振LPFG的方法,这为取代飞秒激光法和紫外曝光法提供了一种新的、低成本的方式,并打破了 CO_2 激光器在实践中难以制备短周期LPFG的局限。通过在4种SMF上分别制备双峰谐振LPFG,验证了 CO_2 激光技术制备双

峰谐振 LPFG 的可行性及通用性。特别地,在 2 种细 SMF 上制备出的双峰谐振 LPFG 具有折射率灵敏度高、插入损耗小、谐振损耗大、结构稳定等优点,其在生物、化学或环境参数检测等重要领域具有较大的应用潜力。

参 考 文 献

- [1] Rong D D, Meng G, Fang X D, et al. Delafossite AgAlO₂ modified long-period grating for highly-sensitive ammonia sensor[J]. *Optics Express*, 2021, 29(25): 42005-42019.
- [2] Zhang Y X, Wang X X, Tang X Y, et al. Photosensitive polymer-based micro-nano long-period fiber grating for refractive index sensing[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(21): 6952-6957.
- [3] Sun M Y, Jiang H T, Shi B, et al. Development of FBG salinity sensor coated with lamellar polyimide and experimental study on salinity measurement of gravel aquifer[J]. *Measurement*, 2019, 140: 526-537.
- [4] 辛鑫, 吴永武, 刘慧敏, 等. 一种新的光纤 Bragg 光栅氢气传感器制作方法[J]. *光学学报*, 2021, 41(4): 0406002. Xin X, Wu Y W, Liu H M, et al. A new fabrication method of fiber Bragg grating hydrogen sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(4): 0406002.
- [5] Vengsarkar A M, Lemaire P J, Judkins J B, et al. Long-period fiber gratings as band-rejection filters[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1996, 14(1): 58-65.
- [6] Rocha A M, Machado A I, Almeida T, et al. Analysis of long period gratings inscribed by CO₂ laser irradiation and estimation of the refractive index modulation[J]. *Sensors*, 2020, 20(22): 6409.
- [7] Ruan Z L, Pei L, Zheng J J, et al. Intensity detecting refractive index sensors with long-period fiber gratings written in STS structure[J]. *Chinese Optics Letters*, 2019, 17(7): 070601.
- [8] Liu S, Zhou M, Zhang Z, et al. Ultrasensitive refractometer based on helical long-period fiber grating near the dispersion turning point[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(10): 2602-2605.
- [9] del Villar I. Ultrahigh-sensitivity sensors based on thin-film coated long period gratings with reduced diameter, in transition mode and near the dispersion turning point [J]. *Optics Express*, 2015, 23(7): 8389-8398.
- [10] Del Villar I, Cruz J L, Socorro A B, et al. Sensitivity optimization with cladding-etched long period fiber gratings at the dispersion turning point[J]. *Optics Express*, 2016, 24(16): 17680-17685.
- [11] Dey T K, Tombelli S, Biswas P, et al. Analysis of the lowest order cladding mode of long period fiber gratings near turn around point[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(12): 4006-4012.
- [12] Zou F, Liu Y Q, Mou C B, et al. Optimization of refractive index sensitivity in nanofilm-coated long-period fiber gratings near the dispersion turning point[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(4): 889-897.
- [13] Zheng Z M, Yu Y S, Zhang X Y, et al. Femtosecond laser inscribed small-period long-period fiber gratings with dual-parameter sensing[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(3): 1100-1103.
- [14] Viveiros D, de Almeida J M M M, Coelho L, et al. Turn around point long period fiber gratings with coupling to asymmetric cladding modes fabricated by a femtosecond laser and coated with titanium dioxide[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(14): 4784-4793.
- [15] Śmietana M, Mikulic P, Bock W J. Nano-coated long-period gratings for detection of sub-nanometric changes in thin-film thickness[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2018, 270: 79-83.
- [16] Tripathi S M, Bock W J, Mikulic P. A wide-range temperature immune refractive-index sensor using concatenated long-period-fiber-gratings[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2017, 243: 1109-1114.
- [17] 黄图斌, 施解龙, 浦珺慧, 等. 电弧法刻写长周期光子晶体光纤光栅的研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(6): 0605002. Huang T B, Shi J L, Pu J H, et al. Long period gratings fabrication by arc discharge in photonic crystal fibers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(6): 0605002.
- [18] Ranjan R, Esposito F, Campopiano S, et al. Sensing characteristics of arc-induced long period gratings in polarization-maintaining panda fiber[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, 17(21): 6953-6959.
- [19] Colaço C, Caldas P, del Villar I, et al. Arc-induced long-period fiber gratings in the dispersion turning points[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(19): 4584-4590.
- [20] 饶云江. 长周期光纤光栅制造方法及装置: CN1355440 A[P]. 2003-11-19. Rao Y J. The manufacture method and device of long period fiber grating: CN1355440A[P]. 2003-11-19.
- [21] Du C, Wang Q, Zhao Y, et al. Ultrasensitive long-period gratings sensor works near dispersion turning point and mode transition region by optimally designing a photonic crystal fiber[J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 112: 261-268.
- [22] 崔春雷, 刘伟平, 黄红斌, 等. 长周期光纤光栅包层模特性及其对传输谱的影响[J]. *光子学报*, 2005, 34(10): 1569-1572. Cui C L, Liu W P, Huang H B, et al. Cladding mode's characteristic and its affects on transmission spectrum of long period fiber gratings[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(10): 1569-1572.
- [23] Ryu H S, Park Y, Oh S T, et al. Effect of asymmetric stress relaxation on the polarization-dependent transmission characteristics of a CO₂ laser-written long-period fiber grating[J]. *Optics Letters*, 2003, 28(3): 155-157.