

文章编号: 0253-2239(2008)02-0255-04

用 157 nm 激光制作的光子晶体光纤 法布里-珀罗传感器

邓洪有¹ 饶云江^{1,2} 冉曾令¹ 廖 弦¹ 刘为俊¹

(¹ 电子科技大学宽带光纤传输和通信网技术教育部重点实验室, 四川 成都 610054)
² 重庆大学光电技术与系统教育部重点实验室, 重庆 400044)

摘要 157 nm 准分子激光用于微加工具有单光子能量高, 峰值功率高, 材料吸收系数高, 分辨率高等优点。利用 157 nm 激光微加工的方法, 在光子晶体光纤上融切出微小矩形孔, 从而构成腔长为 45.6 μm 的微光纤法布里-珀罗干涉腔, 得到的干涉条纹平滑, 衬比度约为 26 dB, 并从激光与石英材料的相互作用上分析了形成较好干涉条纹的原因。把这种微腔应用于应变测量, 在 550 μm 范围内, 腔长增量相对于应变的灵敏度为 0.32 nm/ μm , 线性度达 0.9994。实验证明该微腔对温度不敏感, 800 $^{\circ}\text{C}$ 范围内腔长变化仅 20 nm。157 nm 准分子激光加工光纤法布里-珀罗腔方法简单, 一次成型, 具有较高的加工效率和精度, 有望实现光纤法布里-珀罗腔的规模化批量制造, 具有较好的应用前景。

关键词 光纤光学; 光纤法布里-珀罗腔; 激光微加工; 应变传感器; 光子晶体光纤

中图分类号 TN253 **文献标识码** A

Photonic Crystal Fiber Based Fabry-Pérot Sensor Fabricated by Using 157 nm Laser Micromachining

Deng Hongyou¹ Rao Yunjiang^{1,2} Ran Zengling¹ Liao Xian¹ Liu Weijun¹

¹ Key Laboratory of Broadband Optical Fiber Transmission and Communication Networks
Ministry of Education, University of Electronics Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China
² Key Laboratory of Opto-Electronic Technology and Systems, Ministry of Education, Chongqing University,
Chongqing 400044, China

Abstract A micro rectangle hole is ablated in a photonic crystal fiber by using 157 nm excimer laser pulses to form a fiber Fabry-Pérot cavity (PCF F-P), because the 157 nm excimer laser used in micromachining has high single-photon energy, high peak power, high absorption coefficient and high resolution. The PCF F-P cavity with a length of $\sim 45.6 \mu\text{m}$ has obtained a smooth interference fringe and an excellent fringe visibility of ~ 26 dB. An explanation for the formation of such a high quality cavity is presented based on the interaction mechanism between the laser and silica material. This PCF F-P is used for measurement of strain and a sensitivity of 0.32 nm/ μm and a linearity of 0.9994 within a range of 550 μm are obtained. Furthermore, it is verified that the PCF F-P sensor is insensitive to temperature change as the cavity length only changes 20 nm for a temperature range of 800 $^{\circ}\text{C}$. Such a fiber Fabry-Pérot cavity is fabricated easily and formed straightforwardly with high efficiency and precision, leading to the possibility of mass production of high-quality PCF F-P cavities then extensive applications.

Key words fiber optics; fiber Fabry-Pérot cavity; laser micromachining; strain sensor; photonic crystal fiber

1 引 言

光纤法布里-珀罗(F-P)腔具有结构简单、体积

小、重量轻、结构紧凑、不受电磁场影响、电绝缘性能好等优点,已在民用基础设施的安全监测、工艺过程

收稿日期: 2007-05-30; 收到修改稿日期: 2005-08-30

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(60537040)资助课题。

作者简介: 邓洪有(1982-),男,四川遂宁人,硕士研究生,主要从事光纤通信和光纤传感方面的研究。

E-mail: doiyer@163.com

导师简介: 饶云江(1962-),男,江西人,教授,博士生导师,主要从事光通信、光纤传感、光纤智能结构等方面的研究。

E-mail: yjrao@uestc.edu.cn

的在线监测和航空航天等领域得到了非常成功的应用^[1~3]。但传统的光纤法布里-珀罗腔制作方法都存在较大的不足^[4~7]。近年来,人们在光学元件的制作方法 & 工艺中采用了激光微加工技术^[8],该方法具有很高的效率和精度,克服了传统手工制作方法的缺点。

光子晶体光纤(PCF)具有独特的结构,呈现出无限的单模特性等许多新奇的特性^[9~11]。近年来,人们开始研究光子晶体光纤在传感领域的应用^[12,13]。由于光子晶体光纤传感器的一大优点是光子晶体光纤在很大范围内可以保证单模传输,满足干涉条件,因而本文采用了 157 nm 准分子激光脉冲在光子晶体光纤上制作出了在线的微光子晶体光纤法布里-珀罗干涉腔(PCF F-P 腔),并在此基础上完成了这种光子晶体光纤法布里-珀罗腔的应变和温度传感特性测试。

2 157 nm 准分子激光脉冲制作的光子晶体光纤法布里-珀罗腔

本文制作的新型 M-光子晶体光纤法布里-珀罗腔类似于线型复合腔(ILFE),但在制作方法上有很大的改进。线型复合腔是在两段光纤之间再接入一段与其外径一致的空心光纤,由于空心光纤的长度就是法布里-珀罗腔长,只有几十微米,因此光纤的切割、对准和熔接都很困难;而且将它与光纤熔接容易损伤光纤的反射端面,因而制作高质量线型复合腔的工艺难度较大^[7],并且很难实现批量制造。

采用准分子激光可在光纤上融切出微小矩形孔,从而形成微型光纤法布里-珀罗腔,有望实现光纤法布里-珀罗腔的规模化批量制造。157 nm 准分子激光用于微加工的优点有:

1) 单光子能量高。由光子能量公式 $E \propto c/\lambda$, 可知短波长的紫外激光具有更高的光子能量,和材料相互作用时,它能够直接和材料的化学键进行作用,直接打断材料的一部分化学键,加工方式偏向于冷加工,减少了热效应,这对于提高微加工上的精度是十分有利的。

2) 峰值功率高。157 nm 准分子激光器一般工作在脉冲方式下,它的脉宽一般只有几十纳秒,远远小于一般的激光器,短的激光脉宽可以提高激光的功率密度,也提高了准分子激光的加工效率和质量。

3) 材料吸收率高。 SiO_2 对 157 nm 光源的吸收系数很大,可将光能更高效地转化为材料的内能

从而更有助于材料的刻蚀,提高了微加工的效率。

4) 分辨率高。光学系统所能达到的最高分辨率反比于波长,所以对于相同的光学系统来说,157 nm 准分子激光所能成像的最高分辨率要远高于其它可见光束及红外光束。

光纤 SiO_2 材料强烈地吸收 157 nm 激光高达 7.9 eV 的光子能量,激光以较低的脉冲能量击断 SiO_2 的化学键,纯 SiO_2 被 157 nm 激光刻蚀的能量密度阈值只有 1.1 J/cm^2 ,掺杂会进一步降低该值,化学键的断裂使得加工材料分解成粉末状碎片从材料表面瞬间飞溅出去^[14]。

所用 157 nm 准分子激光微加工系统如图 1 所示,包括准分子激光器(Coherent: LPF202),聚焦系统,观测系统和能够精确控制加工件位置的三维控制台。激光脉冲重复率 20 Hz,能量密度 20 J/cm^2 ,脉宽 17 ns,光斑 $60 \mu\text{m} \times 60 \mu\text{m}$,激光脉冲个数 1600 个。

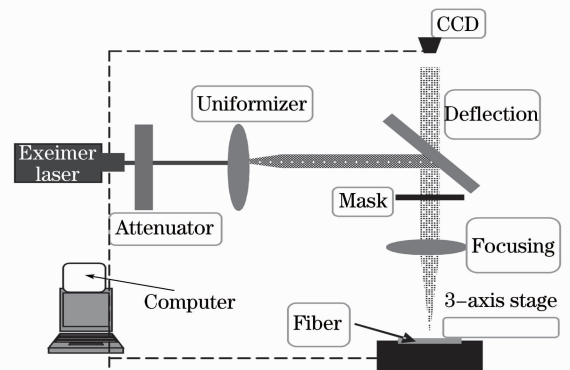
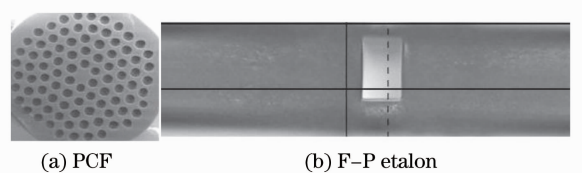


图 1 准分子激光微加工系统示意图

Fig. 1 Schematic of micromachining system based on excimer laser

在全反射导光型光子晶体光纤上用 157 nm 的准分子激光脉冲制作了一个长为 $45.6 \mu\text{m}$,宽为 $65 \mu\text{m}$,深 $80.0 \mu\text{m}$ 的法布里-珀罗腔,制作的 M-光子晶体光纤法布里-珀罗腔实物照片见图 2,光谱图如图 3 所示。



(a) PCF

(b) F-P etalon

图 2 光子晶体光纤及法布里-珀罗腔 SEM 照片

Fig. 2 SEM photos of photonic crystal fiber and Fabry-Pérot etalon

观察图 3 可以发现光子晶体光纤法布里-珀罗腔的干涉条纹平滑,衬比度高,约为 26 dB,用这种

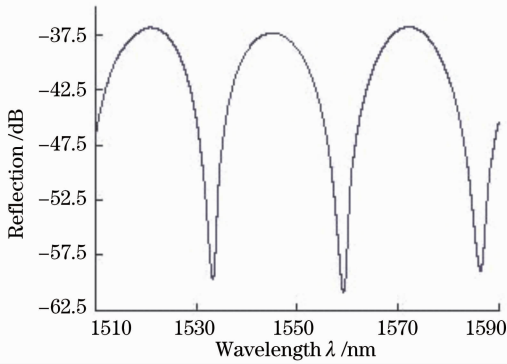


图3 光子晶体光纤法布里-珀罗腔反射光谱图

Fig. 3 Reflection spectrum of the PCF F-P etalon

干涉条纹可进行高精度的测量。光子晶体光纤法布里-珀罗腔反射面粗糙度约 300 nm, 原因分析如下^[14]: 这与光子晶体光纤独特的多孔结构和准分子激光微加工的机理有关。157 nm 激光断裂 SiO₂ 化学键时也包含着非常小的热量过程, 并非纯粹的冷光化学加工。光子晶体光纤中排列着的空气孔, 把光纤中致密的石英材料分离成若干个“薄条”, 当准分子激光和石英相互作用时, 光子晶体光纤中的空气孔使相邻的石英“薄条”热量不易聚集积累, 即散热更好, 从而可更大限度地减少石英“薄条”被激光融切时带来的发热影响, 有效地避免了石英的融化变形。此外, 激光融切时的高温蒸气会急剧膨胀而产生巨大的压力, 此时, 如果融切位置的附近还有熔融状态的材料没有蒸发, 在强大的蒸气压力下熔融材料会向四处飞溅从而形成加工残骸和缺陷, 导致加工区域边缘的凹凸不平。光子晶体光纤中的空气孔可有效地释放所产生的蒸气压力从而可减少由蒸气压力冲击而形成的残骸和缺陷。同时, 由于用来制作光子晶体光纤的石英管材料纯度非常高, 所以对 157 nm 激光的散射很小, 散射的减少保证了激光光束的能量, 从而使加工出的表面更加平整。因此, 由于光子晶体光纤独有的空气孔结构而导致 157 nm 激光和石英相互作用时产生的高温和高压得以较快的“释放”, 从而容易使光子晶体光纤法布里-珀罗腔的反射面平滑, 所以获得的干涉条纹衬比度高。

3 新型微光纤法布里-珀罗应变传感器

本文采用上述的 M-光子晶体光纤法布里-珀罗腔作为光纤应变传感器。根据相干理论, 当原始腔长为 l 时, 某波峰 λ 处的相位关系为

$$4\pi l/\lambda = (2K + 1)\pi, \quad K = 0, 1, \dots \quad (1)$$

由于应变作用使腔长变为 l_1 , 该波峰位移至 λ_1 , 此时相位关系为

$$4\pi l_1/\lambda_1 = (2K + 1)\pi, \quad K = 0, 1, \dots \quad (2)$$

如果干涉条纹移动较小, 使(1)式、(2)式中的 K 相等, 由比例关系算出受应力时的腔长:

$$l_1 = l\lambda_1/\lambda, \quad (3)$$

腔长增量:

$$\Delta l = l_1 - l = l(\lambda_1/\lambda - 1), \quad (4)$$

实验中, 光子晶体光纤法布里-珀罗腔固定于可读数的高精度微动台上, 移动微动台就可对传感器施加轴向应变, 用光谱仪 Si720(美国 MOI 公司)观测干涉条纹的移动。实验结果如图 4 所示, 在 0~550 $\mu\epsilon$ 的范围里, 灵敏度达 0.32 nm/ $\mu\epsilon$, 测量精度为 $\pm 9.1 \mu\epsilon$ 。误差的出现是由于微动台本身误差和肉眼读数误差的原因。

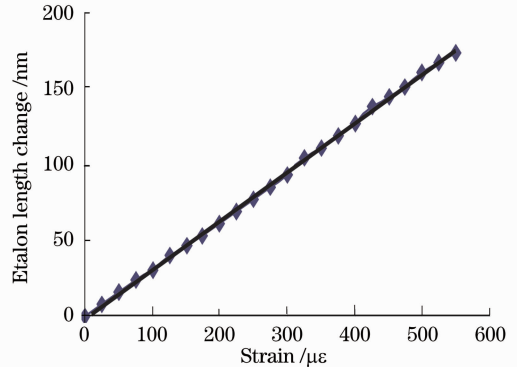


图4 腔长增量与应变的关系

Fig. 4 Relationship between strain and etalon length change

4 新型微光纤法布里-珀罗腔的温度特性

实验测得该 M-光子晶体光纤法布里-珀罗腔从

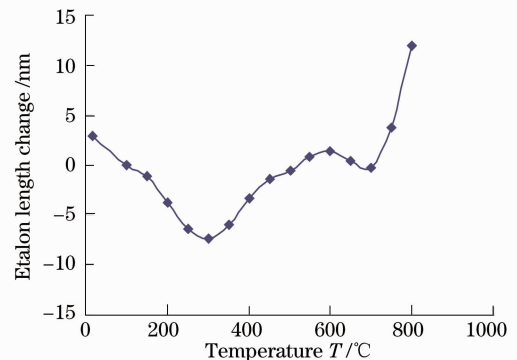


图5 腔长-温度变化曲线

Fig. 5 Relationship between etalon length change and temperature

20~800 °C时光谱的变化情况,见图5,腔长变化20 nm,相当于施加约60 $\mu\epsilon$,温度与应变的交叉敏感度约为0.075 $\mu\epsilon/^\circ\text{C}$,因此该法布里-珀罗腔对温度不敏感。

5 结 论

介绍了一种采用157 nm激光脉冲微加工在光子晶体光纤上制作新型M-光子晶体光纤法布里-珀罗腔的方法,制成的法布里-珀罗腔干涉条纹平滑,衬比度高。该方法克服了光纤法布里-珀罗腔传统制作方法中手工操作、效率低下的缺点。实验表明,该M-光子晶体光纤法布里-珀罗腔作为光纤应变传感器具有较高的灵敏度和很好的线性度。该M-光子晶体光纤法布里-珀罗腔在光纤上一次成型,无需机械拼接,作为全光纤在线器件,它对温度不敏感,20~800 °C范围内腔长变化20 nm。

参 考 文 献

- 1 C. E. Lee, H. F. Taylor, A. M. Markus *et al.*. Optical-fiber Fabry-Pérot embedded sensor[J]. *Opt. Lett.*, 1989, **14**(21): 1225~1227
- 2 M. J. Gander, W. N. MacPherson, J. S. Barton *et al.*. Embedded micromachined fiber-optic Fabry-Pérot pressure sensors in aerodynamics applications[J]. *IEEE Sensors J.*, 2003, **3**(1): 102~107
- 3 Rao Yunjiang, Zeng Xiangkai, Zhu Yong *et al.*. EFPI/FBG strain-temperature sensor and application [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(1): 85~88
饶云江,曾祥楷,朱永等. 非本征型法布里-珀罗干涉仪/光纤布拉格光栅应变温度传感器及其应用[J]. *光学学报*, 2002, **22**(1): 85~88
- 4 Hai Xiao, Jiangdong Deng, Gary Pickrell *et al.*. Single-crystal sapphire fiber-based strain sensor for high-temperature applications[J]. *J. Lightwave Technology*, 2003, **21**(10): 2276~2283
- 5 T. W. Kao, H. F. Taylor. High-sensitivity intrinsic fiber-optic Fabry-Pérot pressure sensor[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(8): 615~617
- 6 Yun-Jiang Rao. Recent progress in fiber-optic extrinsic Fabry-Pérot interferometric sensors[J]. *Optical Fiber Technology*, 2006, **12**(3): 227~237
- 7 J. S. Sirkis, D. D. Brennan, M. A. Putman *et al.*. In-line fiber etalon for strain measurement[J]. *Opt. Lett.*, 1973, **18**(22): 1973~1975
- 8 V. Lendraitis, M. Brikas, V. Snitka *et al.*. Fabrication of actuator for nanopositioning using laser micro-machining [J]. *Microelectronic Engineering*, 2006, **83**(4~9): 1212~1215
- 9 Wang Qingyue, Hu Minglie, Chai Lu. Progress in nonlinear optics with photonic crystal fibers[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(1): 57~66
王清月,胡明列,柴路. 光子晶体光纤非线性光学研究新进展[J]. *中国激光*, 2006, **33**(1): 57~66
- 10 Fang Hong, Lou Shuqin, Ren Guobin *et al.*. Theoretical analysis on splice loss of photonic crystal fibers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(6): 806~811
方宏,娄淑琴,任国斌等. 光子晶体光纤接续损耗的理论分析[J]. *光学学报*, 2006, **26**(6): 806~811
- 11 Kang Li, Yishan Wang, Wei Zhao *et al.*. High power single-mode large-mode-area photonic crystal fiber laser with improved Fabry-Pérot cavity[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(9): 522~524
- 12 W. J. Bock, W. Urbanczyk, J. Wojcik. Measurements of sensitivity of the single-mode photonic crystal holey fiber to temperature, elongation and hydrostatic pressure [J]. *Measurement Science and Technology*, 2004, **15**(8): 1496~1500
- 13 J. B. Jensen, L. H. Pedersen, P. E. Hoiby *et al.*. Photonic crystal fiber based evanescent-wave sensor for detection of biomolecules in aqueous solutions[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(17): 1974~1976
- 14 P. R. Herman, R. S. Marjoribanks, A. Oetl *et al.*. Laser shaping of photonic materials; deep-ultraviolet and ultrafast lasers[J]. *Applied Surface Science*, 2000, **154~155**: 577~586