

光纤光栅制作中波长拉力控制技术研究

宋志强¹ 祁海峰¹ 李淑娟¹ 郭健¹ 王昌¹ 彭纲定²

(¹ 山东省科学院激光研究所山东省光纤传感技术重点实验室, 山东 济南 250014)
² 新南威尔士大学电子工程与通信学院, 澳大利亚 悉尼 2052)

摘要 介绍了在相位掩模板法制作光纤光栅的过程中,通过测量和调节光纤在拉直状态下所承受的拉力,从而精确控制光栅布拉格波长的光纤光栅制作方法。利用此方法,可使光纤光栅的波长制作误差控制在 ± 0.05 nm以内,并利用一定周期的相位掩模板制作5 nm波长范围内的任意波长的光纤光栅,极大地提高了相位掩模板法制作技术的效率和灵活性。同时,提出了利用扫描曝光技术,在光纤光栅刻写过程中持续改变光纤拉力,制作啁啾光纤光栅的新方法。

关键词 光栅;相位掩模板;光栅布拉格波长;拉力;啁啾光纤光栅

中图分类号 O436.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0706009

Research on Control Technology of Fiber Grating Wavelength by Pulling Force in Grating Fabrication

Song Zhiqiang¹ Qi Haifeng¹ Li Shujuan¹ Guo Jian¹ Wang Chang¹ Peng Gangding²

¹ Key Laboratory of Optical Fiber Sensing Technology of Shandong,

Laser Research Institute of Shandong Academy of Sciences, Jinan, Shandong 250014, China

² School of Electrical Engineering and Telecommunications, University of New South Wales, Sydney 2052, Australia

Abstract A fiber Bragg grating (FBG) fabrication method with phase mask to achieve accurate control of Bragg wavelength by measuring and adjusting the pulling force applied on a straightened fiber is introduced. The fabrication error of FBG Bragg wavelength is hold within ± 0.05 nm, and FBGs with central wavelengths covering 5 nm range can be fabricated by using the same phase mask, which improves the efficiency and flexibility of the phase mask fabrication method greatly. Meantime, a novel chirped-FBG fabrication method with scanning exposure technology is put forward by varying the fiber tension during the fabrication procedure.

Key words gratings; phase mask; grating Bragg wavelength; pulling force; chirped fiber grating

OCIS codes 060.2340; 060.3745; 060.3738

1 引言

光纤布拉格光栅(FBG)的出现极大地促进了光纤通信、光纤传感和光纤激光器技术的飞速发展,因此受到人们的高度重视和广泛研究。随着光纤光栅的广泛应用,对光纤光栅制作技术提出了越来越高的要求,各种制作方法也层出不穷^[1-5]。相比而言,相位掩模板(PM)法具有对紫外光源的时空相干性要求低、光栅布拉格波长易于控制、适合同规格光栅

批量生产等许多优点,同时配合准分子激光器建立系统结构简单、可靠性高,从而成为一种非常实用的光纤光栅制作方法并被广泛采用。然而,在一些文献报道^[6-7]中仍指出,由于相位掩模板周期的限制,这种方法缺乏灵活性,只能制作一定布拉格波长的光栅,并且相位掩模板成本较高、容易污损,此方法只适用于批量化生产。为此,本文提出在传统的相位掩模板法光栅制作光路的基础上,对夹持光纤的

收稿日期: 2013-01-31; **收到修改稿日期**: 2013-03-04

基金项目: 山东省自主创新成果转化重大专项(2011ZHZX1A0107)、山东省面上自然科学基金(ZR2010FM039)、山东省中青年科学家科研奖励基金(BS2010DX030)

作者简介: 宋志强(1982—),男,硕士,助理研究员,主要从事光纤光栅和光纤激光器等方面的研究。

E-mail: zhiqiangs@gmail.com

拉力进行测量和调节,以拉力来控制光栅的制作波长,这种方法既能保证光栅制作工艺的灵活性,又能提高光栅制作波长的精确性,极大地提高了制作系统的工作效率。同时,提出了一种利用拉力对光栅制作波长的控制技术,通过在扫描曝光制作过程中持续改变光纤拉力,实现啁啾光纤光栅刻写的新方法。

2 理论依据

一般情况下,相位掩模板光纤光栅制作技术的光路结构如图 1 所示,紫外激光(UV)通过相位掩模板的衍射能量分布到±1 级衍射光上,光敏光纤通过一对夹持器拉直固定在相位掩模板后,两束衍射光在相位掩模板后的交叉干涉条纹对光纤曝光形成光纤光栅。对固定光纤的方式进行了改进,将其中一只夹持器放置在可沿光纤轴向运动的电控位移台上,另一只安装了应力计,这样即可监测光纤拉直时承受的拉力,又可根据所需制作的光栅波长调节拉力至合适的值。

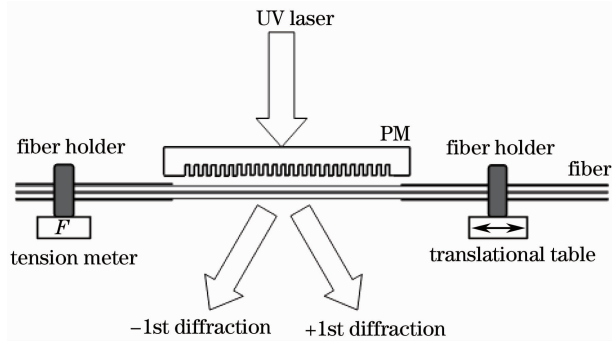


图 1 相位掩模板法光纤光栅制作光路

Fig. 1 Fabrication system of FBG by phase mask method

由耦合模理论可知,相位掩模板法中光栅布拉格波长可表示为

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda_g = n_{\text{eff}}\Delta_{\text{PM}}, \quad (1)$$

式中 n_{eff} 为光纤平均有效折射率, Λ_g 为光纤光栅周期,它是相位掩模板周期 Δ_{PM} 的一半。由于光纤折射率的相对变化一般很小,光纤光栅的布拉格波长主要由相位掩模板的周期决定。但在实际的制作工艺中,需要将光纤拉直再夹持固定,难免要对光纤施加一定的拉力,而当光栅制作完成撤去拉力后布拉格波长将会变小。对此过程中光栅波长的变化可由光纤光栅应变效应^[8-9]来分析。

根据胡克定律,若沿光纤轴向施加拉力 F ,则光纤产生的轴向应变为

$$\epsilon_z = \frac{1}{E} \cdot \frac{F}{S}, \quad (2)$$

式中 E 为光纤杨氏模量, S 为光纤的横截面积。当光纤光栅受到拉力时,根据光栅的应变效应,光纤光栅布拉格波长会向长波长漂移,波长变化量 $\Delta\lambda_B$ 与光纤应变量的关系为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_e) \cdot \epsilon_z, \quad (3)$$

式中 P_e 为光纤的有效应变光系数。由此可知,拉力引起的光栅波长变化可表示为

$$\Delta\lambda_B = (1 - P_e)\lambda_B\epsilon_z = (1 - P_e)\lambda_B \frac{1}{E} \frac{F}{S}. \quad (4)$$

考虑到光纤光栅制作过程中,拉力 F 是在形成光纤光栅之前预加的,(4)式中 λ_B 为对应相位掩模板周期的理论波长, $\Delta\lambda_B$ 为光栅波长可通过拉力调节的范围,在此 $\Delta\lambda_B$ 为负值,表示通过预加拉力调节光栅制作波长只能往比理论波长短的方向。

对于普通掺锗石英光纤^[10], $E = 7.0 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$, $P_e = 0.22$, 光纤直径为 $125 \mu\text{m}$,则由(4)式计算得光栅波长可调范围与拉力的关系为 $\Delta\lambda_B = 9.08 \times 10^{-4} \cdot \lambda_B F$ 。对于周期为 1070 nm 的相位掩模板和有效折射率为 1.448 的光敏光纤, 0.01 N 重量的拉力 ($F = mg$, m 为物体的质量, g 为重力加速度, $g = 9.8 \text{ m/s}^2$) 变化可使光栅布拉格波长变化约 0.014 nm ,而对于标准通信光纤短期允许应变变量一般小于 $10000 \mu\epsilon$ ^[11],则 $\Delta\lambda_{B\text{max}}$ 最大可达 12 nm 。

3 实验结果与讨论

3.1 光栅布拉格波长拉力控制及调节

实验中,光纤夹持器分别固定在应变电桥推拉力计和带有电动驱动杆的 Newport 位移台上,推拉力计的精度为 1 g (约 0.01 N),电动驱动杆的最小步长为 $0.03 \mu\text{m}$,采用 KrF 准分子激光器和周期为 1064 nm 的相位掩模板曝光制作光纤光栅,光敏光纤采用 12 MPa 压强下进行了两周载氢增敏的长飞通信光纤,采用恒河 AQ6370C 光谱仪测量光栅波长。

首先在放置光纤时,将拉力分别调节至 50 g 和 100 g 重量,采用相同的曝光量进行曝光制作,释放拉力后测量记录光栅波长,分别重复制作了 10 只光栅,结果如图 2 所示。可以看到,两组拉力下制作的光栅布拉格波长的制作误差均小于 0.05 nm ,考虑到光谱仪的分辨率为 0.02 nm ,可以认为拉力控制技术有效提高了光栅布拉格波长的一致性。

在制作光纤光栅前,设定不同的光纤预拉力,在同样的曝光量下曝光制作光纤光栅,分别测量记录预拉力释放前后的结果如图 3 所示。图中分别给出

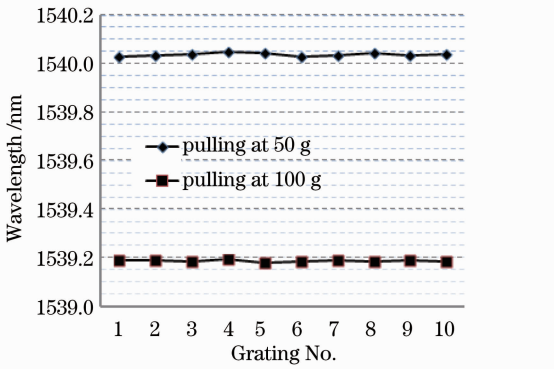


图 2 重复制作的光栅布拉格波长一致性
Fig. 2 Wavelength uniformity of FBGs manufactured repeatedly

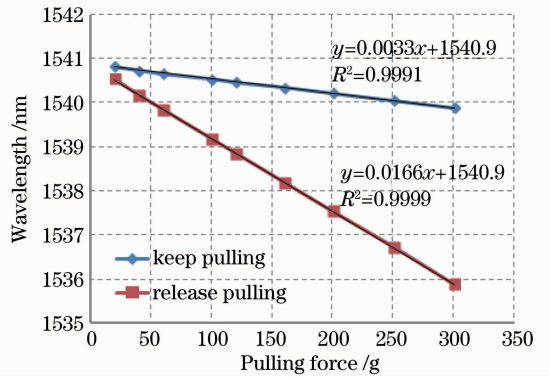


图 3 光栅布拉格波长与拉力的关系
Fig. 3 Relationship between FBG wavelength and pulling force

了预拉力释放前后的光栅布拉格波长和预拉力的对应关系,可以看出,无论是否保持拉力,光栅布拉格波长都与拉力呈线性关系。预拉力越小,释放应力前后的光栅波长越接近,并趋近于相位掩模板周期对应的理论波长;而预拉力越大,则所获得的光栅布拉格波长越小。对数据曲线进行线性拟合看出,利用拉力调节光栅布拉格波长,光纤光栅具有 1.66 nm/N 的波长拉力系数,与理论计算的 1.4 nm/N 的结果略有差别,这是由于不同材料和光敏性的光纤的波长拉力系数是不同的,这在后来的实验研究中也得到了证实。在实验所能施加的 3 N 拉力下,1064 nm 周期的相位掩模板可制作约 5 nm 的波长范围内的光纤光栅。实验结果同时证明,光纤的有效应变光系数不是常数,而是随着光纤轴向应变的增大而增大^[8],因此在光纤光栅曝光制作完成后,在保持光纤拉力不释放的情况下,不同预拉力下制作的光栅布拉格波长也不是恒定不变的,而是随拉力变大而变小。

3.2 变拉力制作啁啾光纤光栅

拉力调节光栅布拉格波长实质上是改变了光纤光栅的有效周期,因此若在光纤光栅制作过程中持续地改变拉力,则光栅周期也会连续变化,理论上可以实现周期渐变的啁啾光纤光栅结构^[12-13]。将紫外激光通过直线运动平台匀速扫描曝光相位掩模板和光纤,同时通过程序控制 Newport 位移台的缓慢匀速运动,使光纤拉力逐渐变大或变小,由此尝试制作线性啁啾光纤光栅。

通过测量标定,可设定电动驱动杆推拉引起的拉力变化速度为 0.003 N/s,设定曝光扫描速度为 0.02 mm/s,则当光栅扫描制作长度为 10 mm 时,拉力变化量为 1.5 N,光栅曝光起止段对应的布拉格波长变化为 2.49 nm,光栅应具有至少 2 nm 的带宽。设置光纤初始拉力分别为 0.3 N 和 2 N,以 0.003 N/s 的速度分别增大和减小光纤拉力,按照上述参数制作的光纤光栅的光谱如图 4 所示。

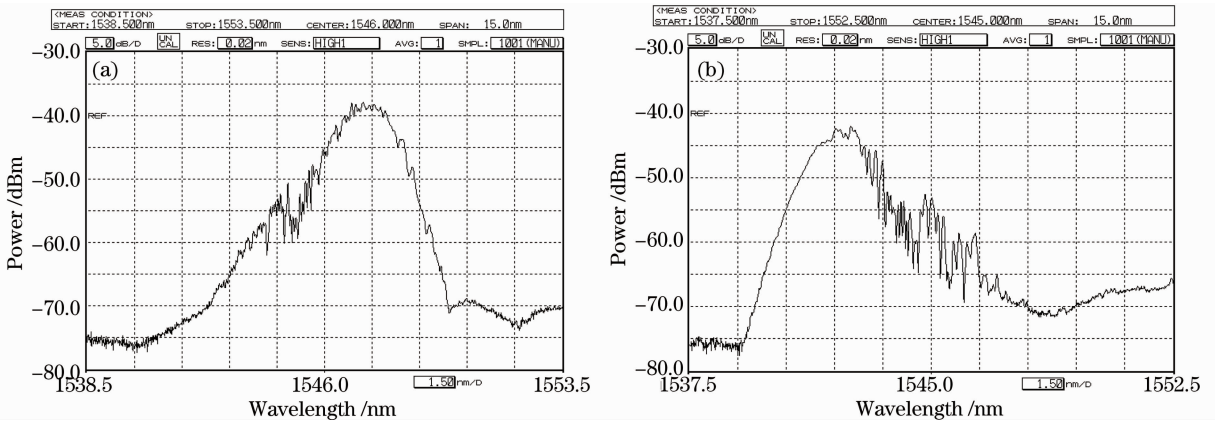


图 4 变拉力制作啁啾光纤光栅光谱。(a)拉力增大(负啁啾);(b)拉力减小(正啁啾)

Fig. 4 Spectra of chirped grating manufactured by gradually changing pulling force. (a) Force increasing (negative chirp); (b) force decreasing (positive chirp)

实验结果表明,无论逐步增大还是减小光纤拉力,光栅谱形都呈现出了啾啾光栅带宽变宽的特征,并且波长范围分别往短波长(负啾啾)和长波长(正啾啾)延伸变化,同时由于光栅对单一布拉格波长的耦合强度的弱化,其带宽的变宽是以反射率的降低为代价的^[14]。此外,通过观察光栅制作过程中衍射条纹的图样变化认为,光纤拉力的持续变化一方面

会导致光纤相对于紫外激光聚焦光斑的位置变化,另一方面可能会引入不确定的光纤抖动,这都会影响光纤有效曝光量的均匀性,因此光栅的平坦度较差。故对此制作工艺进行了修改,在光纤曝光的起始和结束的 1 mm 长度,只扫描曝光而不改变拉力,使光栅能够形成足够强度的反馈,实验结果有所改善,光纤拉力的变化曲线和光栅反射谱如图 5 所示。

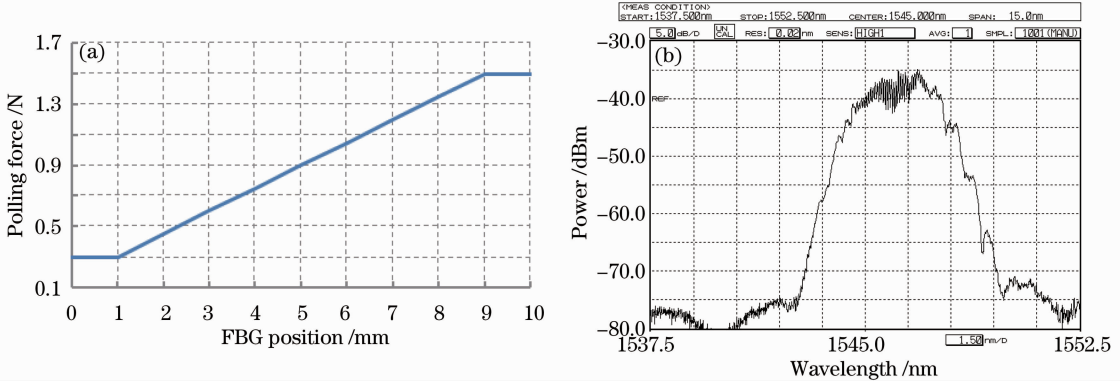


图 5 (a)拉力变化曲线; (b)啾啾光栅反射谱

Fig. 5 (a) Change curve of pulling force; (b) spectrum of the chirped grating

4 结 论

迄今为止,相位掩模板直接曝光法是最为成熟有效的光纤光栅制作技术。尽管相关研究已经很多,但对制作工艺的进一步深入挖掘仍有助于光纤光栅制作技术的不断提升。通过光纤拉力控制光栅的制作波长,无论是对相位掩模板的利用率和灵活性,还是对光栅制作波长的精确度都是一种有效的保障手段。另外,变拉力光栅制作工艺提供了一种可行的利用均匀相位掩模板的啾啾光纤光栅制作方法,对其制作工艺还需要进一步的研究探索以实现更加实用的啾啾光栅的制作。

参 考 文 献

- 1 K O Hill, G Meltz. Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview [J]. *J Lightwave Technol*, 1997, 15(8): 1263–1276.
- 2 Li Yao, Zhao Hong, Zhu Chen, et al.. Study on fiber grating technology [J]. *Laser & Infrared*, 2006, 36(9): 749–754.
李尧, 赵鸿, 朱辰, 等. 光纤光栅技术综述[J]. *激光与红外*, 2006, 36(9): 749–754.
- 3 Wang Li, Chang Liping, Chen Jialin, et al.. A fiber grating etching method with small tunable range of grating wavelength employing phase mask [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(3): 452–455.
王利, 常丽萍, 陈嘉琳, 等. 一种利用相位掩模板对光栅波长进行微调的光栅刻写方法[J]. *光子学报*, 2008, 37(3): 452–455.
- 4 Zhang Ling, Miao Fei, Feng Dejun, et al.. Exposure experiment study of fiber Bragg grating by femtosecond laser [J]. *Chinese J*

- Lasers*, 2011, 38(5): 0505006.
张玲, 苗飞, 冯德军, 等. 飞秒激光对光纤布拉格光栅的曝光实验研究[J]. *中国激光*, 2011, 38(5): 0505006.
- 5 Xu Tuanwei, Li Fang, Liu Yuliang. Spectral characteristics of fiber Bragg gratings in large mode area double clad fibers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(5): 0523006.
徐团伟, 李芳, 刘育梁. 大模场双包层光纤光栅的光谱特性[J]. *光学学报*, 2012, 32(5): 0523006.
- 6 Liu Yang, Wang Xiaobing, Sun Bin, et al.. Study on fabrication methods of fiber gratings [J]. *Laser & Infrared*, 2007, 37(4): 348–351.
刘洋, 王小兵, 孙斌, 等. 光纤光栅制作技术研究[J]. *激光与红外*, 2007, 37(4): 348–351.
- 7 Huang Quan, Qin Zixiong, Zeng Qingke, et al.. The latest progress in the fabrication technology of fiber gratings [J]. *Optical Communication Technology*, 2006, 30(6): 19–21.
黄权, 秦子雄, 曾庆科, 等. 光纤光栅制作技术的最新进展[J]. *光通信技术*, 2006, 30(6): 19–21
- 8 He Wei, Chen Hongbo, Mei Jiachun, et al.. Study on the strain-optic effect in fiber Bragg gratings [J]. *J Optoelectronics•Laser*, 2002, 13(9): 885–888.
何伟, 陈宏波, 梅家纯, 等. 光纤光栅中光弹效应的研究[J]. *光电子•激光*, 2002, 13(9): 885–888.
- 9 Wu Yonghong, Qu Wenjun, Shao Changjiang, et al.. Basic optical-mechanical transformation theoretical equation for FBG strain sensors [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(8): 2067–2070.
吴永红, 屈文俊, 邵长江, 等. 光纤光栅应变传感器光-力转换的理论方程[J]. *光学学报*, 2009, 29(8): 2067–2070.
- 10 China National Standardization Management Committee. Specifications for Optical Fiber Test Methods [S]. GB/T 15972.30. Beijing: China Standard Press, 2008.
国家标准化技术委员会. 光纤试验方法规范[S]. GB/T 15972.30. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- 11 Wu Kun, Li Chuan, Li Yingna, et al.. Research of fiber Bragg grating sensor with large strain [J]. *Chinese J Sensors and*

- Actuators, 2011, 24(8): 1141-1146.
- 吴 堃, 李 川, 李英娜, 等. 大应变光纤 Bragg 光栅传感器的研究[J]. 传感技术学报, 2011, 24(8): 1141-1146.
- 12 Li Bin, Liu Yan, Tan Zhongwei, et al.. Linearly chirped fiber gratings using uniform phase mask [J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(3): 414-418.
- 李 彬, 刘 艳, 谭中伟, 等. 利用均匀相位掩模板制作线性啁啾光纤光栅[J]. 光学学报, 2008, 28(3): 414-418.
- 13 Yang Ying, Gu Zhengtian. Ultra-wideband filtering characteristics of chirped long-period fiber gratings with apodization optimization [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(10): 1006006.
- 杨 颖, 顾铮先. 啁啾长周期光纤光栅的超宽带滤波特性及其切趾优化[J]. 光学学报, 2012, 32(10): 1006006.
- 14 T Erdogan. Fiber grating spectra [J]. J Lightwave Technol, 1997, 15(8): 1277-1294.

栏目编辑：王晓琰