

光纤布拉格光栅制作中心波长控制技术

唐健峰¹, 季树滨², 车雅良¹, 张灵芝³, 张引发^{1*}

¹国防科技大学信息通信学院, 陕西 西安 710100;

²西安邮电大学计算机学院, 陕西 西安 710121;

³重庆交通大学建筑与城市规划学院, 重庆 400074

摘要 为了解决光纤布拉格光栅制作中波长控制的问题,提高已有方案的精度,提出了一种基于相位掩模法刻写布拉格光栅过程中拉力调节和紫外光补偿的光栅刻写波长两步控制法。在光纤两端悬挂砝码调节其所受拉力,使刻写光栅的中心波长略小于目标波长。使用功率均匀的紫外光对光栅整体进行照射,补偿光栅中心波长到目标波长的差距。该方案控制下,光栅中心波长控制误差在 ± 5 pm以内,且对原平台改造小,不会破坏刻栅平台稳定性。实验证明1 cm长的切趾布拉格光栅反射率可达到30 dB以上。相比已有的应力控制方法,该方法具有控制精度高、平台改动小、系统稳定性好的优点。

关键词 光纤光学; 光纤布拉格光栅; 中心波长控制; 拉力调节; 紫外光补偿; 相位掩模法

中图分类号 O436.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.070604

Control of Central Wavelength in Fiber Bragg Grating Fabrication

Tang Jianfeng¹, Ji Shubin², Che Yaliang¹, Zhang Lingyi³, Zhang Yinfa¹

¹ School of Information and Communications, National University of Defense Technology, Xi'an, Shaanxi 710100, China;

² School of Computer Science & Technology, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an, Shaanxi 710121, China;

³ College of Architecture and Urban Planning, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China

Abstract In order to solve the problem of wavelength control during the fiber Bragg grating fabrication, and to improve the precision of the existing solutions, a method based on the phase mask, including two steps of tension adjustment in the Bragg grating inscription and uniform ultraviolet irradiation, is proposed. The tension is adjusted by hanging weight at both ends of the fiber to make the grating central wavelength slightly smaller than the desired wavelength, then ultraviolet light is irradiated on the grating uniformly along the fiber to compensate the difference between the grating central wavelength and the desired wavelength. The error of grating wavelength is controlled within ± 5 pm, and the change of the grating platform is small, which will not destroy the platform stability. Experiment result shows that the reflectivity of 1 cm long apodised Bragg grating reaches more than 30 dB. This method is simpler, more accurate and reliable compared with the existing methods.

Key words fiber optics; fiber Bragg grating; central wavelength control; tension control; ultraviolet light compensation; phase mask method

OCIS codes 060.2340; 060.3745; 060.3738

收稿日期: 2016-11-24; 收到修改稿日期: 2016-12-20

基金项目: 西安市科技计划[CXY1525(2)]

作者简介: 唐健峰(1990—),男,硕士,助教,主要从事光纤传感、光栅刻写和窄线宽光纤激光器方面的研究。

E-mail: tangjianfeng2009@163.com

* 通信联系人。E-mail: yinfazhang@163.com

1 引言

近年来,随着光纤布拉格光栅(FBG)在光纤通信、光纤传感和光纤激光器技术中应用的不断增多,对光纤光栅制作技术提出了越来越高的要求。相位掩模法是光纤光栅刻写常用的方法之一。该方法对紫外光源的空间相干性要求低,适合工业中的批量生产。但是基于相位掩模法刻写FBG过程中,由于相位掩模板具有确定的周期,所刻写的光栅波长缺乏灵活性,难以精确刻写指定波长光栅。尤其当光纤光栅中心波长控制精度影响系统性能时^[1-3],更需要对光栅刻写中波长控制技术进行研究。

目前,基于相位掩模法的光栅波长控制工艺通常采取施加预应力的方法^[4-6]。精度较高的方式是将光纤夹持器安装在微位移系统上,光栅波长控制精度取决于拉力控制的精度。目前该方法中心波长控制误差小于50 pm^[5-6]。仅依赖拉力控制的方法增加了刻栅系统的复杂度和成本,并且将光纤夹持器安装在移动平台上与安装在固定平台上相比会降低刻栅系统的稳定性,长时间刻栅时难以保证掩模板与光纤相对位置不变,甚至出现光栅反射率回退的现象。

本文提出了拉力控制加紫外曝光补偿的两步控制法。通过悬挂重物对光栅中心波长粗略控制,再利用光纤折射率随紫外曝光增大的性质对光栅中心波长进行精确调节。与微位移拉力控制方法相比,所提出的方法控制过程操作复杂,但是悬挂重物的方式降低了系统改造成本,并且光纤夹持器安装于固定平台上,保证了系统稳定性。用紫外曝光补偿保证了波长控制精度高于微位移控制系统精度。

2 理论依据

光纤光栅中心波长漂移量 $\Delta\lambda$ 与轴向应力之间的关系为^[7]

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = (1 - P) \frac{F_z}{E \cdot S}, \quad (1)$$

式中 P 为光纤有效应变系数, F_z 为沿光纤轴向拉力, E 为光纤杨氏模量, S 为光纤横截面积, λ_0 为光纤光栅中心波长。对于普通单模石英光纤, $P=0.22$, $E=7 \times 10^{10}$ N/m², 光纤直径为 125 μm , 可知波长漂移为

$$\Delta\lambda = 9.08 \times 10^{-4} \lambda_0 F_z. \quad (2)$$

由(2)式可知,光纤光栅中心波长漂移与轴向应力呈线性关系,通过拉力调节可实现中心波长的控制。

由光栅中心波长与光纤折射率关系 $\lambda_0 = 2n\Lambda$ (n 为光纤平均折射率, Λ 为相位掩模板的周期)可知,当光纤平均折射率 n 变化时,布拉格波长发生变化。改变平均折射率即可实现对光栅中心波长的控制。研究表明,光敏光纤光致折射率增量与曝光量之间呈现多项 e 负指数变化规律^[8],关系式为

$$\Delta n(\lambda) = \Delta n_{\max} - \Delta n_{\max 1} \exp(-k_1 I t) - \Delta n_{\max 2} \exp(-k_2 I t), \quad (3)$$

式中 Δn_{\max} 是光敏光纤折射率增量的最大极限, $\Delta n_{\max 1}$ 和 $\Delta n_{\max 2}$ 分别是光纤的第一类和第二类缺陷导致的折射率增量最大值, I 为紫外光强, t 为曝光时间, k_1 和 k_2 为光纤两类缺陷原子的紫外光吸收系数。用均匀的紫外脉冲光持续照射光纤光栅,光栅平均折射率不断增大,光纤中心波长将向长波方向移动。因此可使用紫外曝光法改变光栅中心波长,实现对中心波长的精确控制。

3 方案设计及实验结果

3.1 中心波长控制方案设计

实验采用图1所示的切趾光纤光栅刻写装置。紫外脉冲激光器发出波长为245 nm的紫外脉冲光,脉冲频率、能量可控。使用C波段的放大自发辐射(ASE)宽谱光源和波长分辨率为10 pm的光谱仪对光栅透射谱进行在线监测。光纤夹具保证刻栅时光纤与相位掩模板相对位置不变。

光栅中心波长控制通过两步实现。第一步:完成光纤光栅刻写和中心波长粗略控制。假设刻写光纤光栅中心波长为 λ_0 , 使用周期为 Λ_1 的相位掩模板,保证其理论波长 $\lambda_1 = 2n\Lambda_1$ 略大于 λ_0 。刻栅前对光纤施加预应力,完成光栅刻写后光栅波长为 λ_1 。松开应力,光栅中心波长向短波方向偏移到 λ_2 , 所加应力大小需保证波长移动后 λ_2 略小于 λ_0 , 记录波长差 $\Delta\lambda = \lambda_0 - \lambda_2$ 。第二步:紫外直流光补偿。重新对光栅施加拉力,光栅波长由 λ_2 向长波方向移动到 λ_3 。调节相位掩模板的高度,使紫外脉冲光通过掩模板边沿的非掩模区均

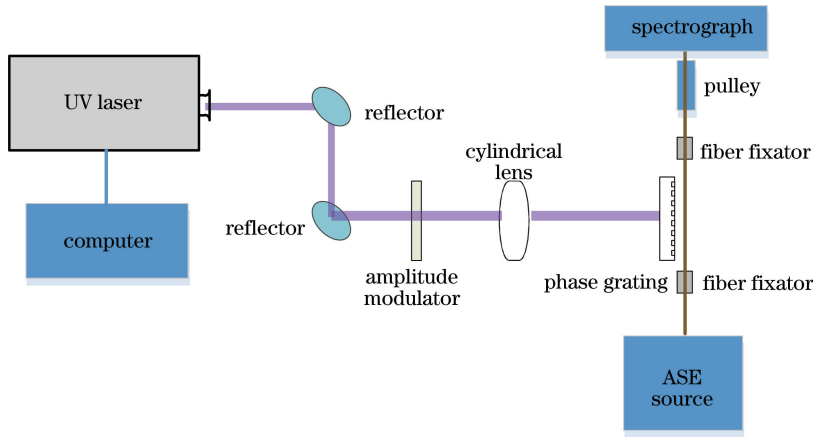


图1 切趾光栅刻写系统结构图

Fig. 1 Fabrication system of the apodised grating

匀照射在光栅上。打开紫外激光器,设置紫外光的脉冲频率和功率。由于光栅仍具有光敏性,当受到紫外照射时平均折射率增大,其波长向长波方向偏移。当偏移量达到 $\Delta\lambda$ 时关闭激光器,松开应力后,光栅波长将达到所需的 λ_0 。

3.2 实验结果

根据理论分析,光栅波长偏移量与施加拉力呈线性关系,所加拉力越大,偏移量越大。实验中采用在光纤一端悬挂重物的方式施加拉力,为了定量分析光纤光栅波长偏移量与重物质量之间的关系,消除系统误差,实验测量了 1533.26 nm 光栅波长漂移与重物质量之间的关系。分别测量了悬挂 0~55 g 重物对应的光栅中心波长,结果如图 2 所示。

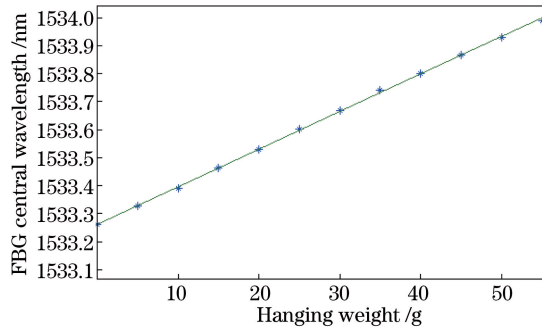


图2 悬挂重物与光栅中心波长的关系图

Fig. 2 Relationship between the weight of hanging objects and FBG central wavelength

由图 2 可知,所加重物在 0~55 g 范围内,波长漂移量与所挂重量呈线性关系。根据实验结果进行线性拟合,得出拟合直线斜率为 0.014。

刻写特定波长光栅时,根据以上结果选择悬挂重物质量。以刻写中心波长为 1535.52 nm 的光栅为例。相位掩模板周期 $\Lambda_0 = 830.1$ nm,光纤折射率 $n = 1.45$,为了保证收缩后的中心波长略小于 1535.52 nm,在光纤两端加 15 g 的砝码。按照切趾光栅的方法刻写光栅,去除应力后光栅透射谱如图 3 所示,插图部分为部分放大。

从图 3 插图中可看出,此时光栅中心波长为 1535.49 nm,略小于所需要的波长 1535.52 nm,波长差为 30 pm。将相位掩模板调低,使紫外光通过透明区直接照射到光栅上,当光栅的中心波长漂移 30 pm 时,关闭紫外激光器。最终的光栅透射谱如图 4 所示,插图部分为透射谱的部分放大。

结果显示,紫外曝光补偿后 FBG 中心波长达到了预期的 1535.52 nm。补偿过程中低脉冲功率有利于提高控制精度。但受限于光谱仪分辨率(10 pm),控制精度不能无限提高,波长控制精度可达到 ± 5 pm。整个平台稳定,刻写时光栅未出现衰落现象,所刻写的光栅长为 1 cm,其中心波长反射率达到 30 dB 以上。补偿之后光栅反射谱型发生了变化,是由于补偿过程中功率不均导致光栅切趾效果变差。

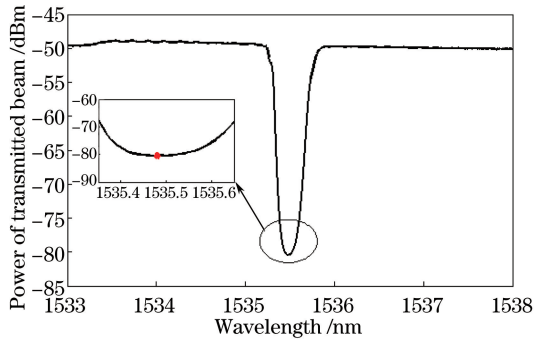


图 3 补偿前光栅透射谱(插图为透射谱的部分放大)
Fig. 3 Transmission spectrum of the grating before compensation. Inset: enlargement of partial spectrum

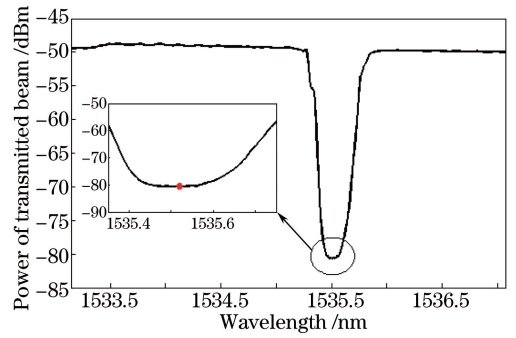


图 4 补偿后光栅透射谱(插图为透射谱的部分放大)
Fig. 4 Transmission spectrum of the grating after compensation. Inset: enlargement of partial spectrum

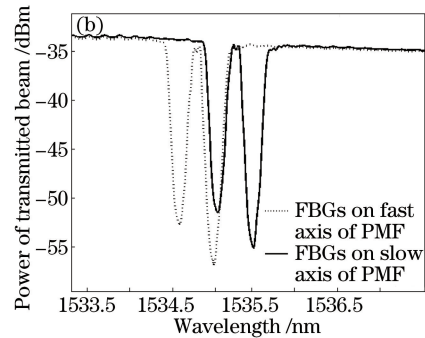
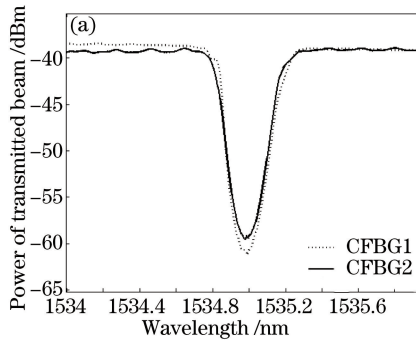


图 5 光栅组合器件透射谱。(a)光纤光栅 FP 腔光栅对透射谱;(b)快慢轴相对的保偏光纤对透射谱

Fig. 5 Transmission spectra of the grating combination device. (a) Transmission spectra of the fiber grating FP cavity grating pair; (b) transmission spectra of the PMF pair with fast and slow axis overlap

基于上述光栅刻写波长控制方法,实验使用光敏光纤刻写了光栅法布里-珀罗(FP)腔对,使用载氢保偏光纤(PMF)刻写了快慢轴相对的保偏光纤对,进一步验证该方法的可行性。光栅组合器件各光栅透射谱如图 5 所示。

图 5(a)为光纤光栅 FP 腔对透射谱,CFBG 代表啁啾光纤布拉格光栅,两光栅中心波长为 1535 nm,反射率均达到了 20 dB 以上,将光栅对熔接后可构成光纤光栅 FP 腔。实验完成了两光栅高精度对轴,进一步表明该方法具有很高的波长控制精度,可实现光纤组合器件的制作。

图 5(b)为采用载氢保偏光纤刻写的快轴和慢轴相对的保偏光纤对透射谱。保偏光纤快慢轴折射率的差异导致两个方向的反射中心不重合。使用偏振控制器控制输入保偏光栅偏振光的方向,观察两个轴的反射率。图 5(b)中虚线为快轴反射率,实线为慢轴反射率,由图可知其中一个光栅的快轴反射中心与另一光栅的慢轴反射中心在 1535 nm 处实现了重叠,证明了该方法在复杂光纤光栅组合器件制作中的可行性。但由于载氢光纤刻栅完成后需要退火处理,光栅中心波长向短波方向移动,最终导致退火后两光栅中心波长不能严格对准。

4 结 论

光纤光栅刻写波长控制技术对于光纤光栅制作具有重大意义,在不改变原光纤光栅刻写系统结构的前提下,利用拉力和整体紫外曝光补偿实现特定波长的刻写控制。该方法仅限于使用光敏光纤,当使用载氢处理的光纤刻写光栅时,退火过程会使光栅波长向短波方向移动,移动量与载氢过程直接相关。为了提高该方法的普适性,对载氢光纤刻写光栅时波长的控制需要进一步研究。

参 考 文 献

- [1] Yang Zhenkun, Chen Jian, Tong Shicun, *et al.* Wavelength-migration demodulation project designing and analysis of

- matched fiber Bragg grating[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2006, 19(2): 407-410.
- 杨振坤, 陈健, 童诗存, 等. 匹配型光纤布拉格光栅波长移动解调方案设计与分析[J]. 传感技术学报, 2006, 19(2): 407-410.
- [2] Sheng Qiuqin, Shi Kebin, Gao Limo, *et al.* Study on the method of matching detection of fiber grating vibration sensor [J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22(7): 847-851.
盛秋琴, 施可彬, 高立模, 等. 光纤光栅振动传感匹配检测方法的研究[J]. 光学学报, 2002, 22(7): 847-851.
- [3] Mo S, Huang X, Xu S, *et al.* 600-Hz linewidth short-linear-cavity fiber laser[J]. Optics Letters, 2014, 39(20): 5818-5821.
- [4] Lu Huibin, Li Cailing, Wang Lu, *et al.* Novel fabrication method of multi-wavelength array gratings on ribbon optical fiber[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(10): 1005003.
卢辉斌, 李彩玲, 王璐, 等. 新型带状光纤中阵列光栅刻写方法[J]. 光学学报, 2015, 35(10): 1005003.
- [5] Song Zhiqiang, Qi Haifeng, Li Shujuan, *et al.* Research on control technology of fiber grating wavelength by pulling force in grating fabrication[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 0706009.
宋志强, 祁海峰, 李淑娟, 等. 光纤光栅制作中波长拉力控制技术的研究[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0706009.
- [6] Liu Yanyan, Jiang Fengxian, Hou Jiapeng, *et al.* Research of inscription technique for multi-wavelength array fiber gratings in ribbon fiber[J]. Laser Technology, 2015, 39(4): 484-487.
刘燕燕, 姜凤贤, 侯佳鹏, 等. 带状光纤多波长阵列光栅刻写工艺研究[J]. 激光技术, 2015, 39(4): 484-487.
- [7] Hill K O, Meltz G. Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview[J]. Journal of Lightwave Technology, 1997, 15(8): 1263-1276.
- [8] Zhang Dongsheng, Kai Guiyun, Jiang Li, *et al.* Study on the relationship between photo-induced index increment of photosensitive fiber and its dose[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2005, 16(5): 523-525.
张东生, 开桂云, 姜莉, 等. 光敏光纤光致折射率增量与曝光量关系的研究[J]. 光电子 • 激光, 2005, 16(5): 523-525.