

光纤布拉格光栅制作中热效应影响的实验研究

宋志强¹ 祁海峰¹ 王昌¹ 常军² 彭刚定³

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 山东大学信息科学与工程学院, 山东 济南 250100
³ 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 采用相位掩模板法, 实验研究了准分子激光器制作光纤布拉格光栅(FBG)过程中, 紫外光热效应对光栅生长过程和光谱结构的影响。研究发现, 相位掩模板法直接曝光法中, 对同一段光敏光纤进行累加曝光, 其反射率不会随着曝光量的增大而线性增长, 而在多次曝光时会产生光栅反射率变小的“漂白”现象, 并且多次曝光的时间间隔越短, “漂白”的过程也越长; 相同的曝光量下, 激光器重复频率越高, 则曝光所用时间越短, 所形成的光纤光栅的反射率越高; 扫描曝光制作光纤光栅时, 在相同的曝光参数下, 扫描移动方向的不同会导致光栅旁瓣分布规律的不同, 由此提出了光栅制作过程中存在“热致啁啾”现象。

关键词 光纤光学; 光纤布拉格光栅; 热效应; 相位掩模; 热致啁啾

中图分类号 O436.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.120602

Experimental Research of Thermal Effect in FBGs Fabrication

Song Zhiqiang¹ Qi Haifeng¹ Wang Chang¹ Chang Jun² Peng Gangding³

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 Information Science and Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250100, China

³ School of Electrical Engineering and Telecommunications, University of New South Wales, Sydney 2052, Australia

Abstract Thermal effect of ultraviolet laser in fabricating and spectrum of fiber Bragg grating (FBG) was experimentally researched by phase mask method. Results indicated that, getting the same photosensitive fiber had accumulative exposures by the way of phase mask straight exposure, the grating reflectivity will not be linearly increased with the exposure level, but will be diminished, which is called “bleaching”. The process of bleaching had some connection with the interval of multiple-exposure. The shorter of interval was, the longer time of bleaching process will take. On the condition of having the same quantity of illumination, the higher exposure frequency rate of laser was, and the less time the exposures take, the grating reflectivity will be higher. During scanning exposure to make uniform FBG, on the condition of having the same exposure parameter, differ of scanning directions leads to different regularities of distribution of side lobes. Thermal-induced chirping in FBG fabrication was proposed for the first time.

Key words fiber optics; fiber Bragg grating; thermal effect; phase mask; thermal-induced chirping

OCIS codes 060.2340; 060.3745; 060.3738

1 引言

光纤布拉格光栅(FBG)是一种光波长选择器件,具有良好的温度和应变敏感特性,因此被广泛应用于温度、应力和应变监测系统。目前,研究人员已针对FBG的高低温特性^[1,2]、热稳定性^[3]和温度与应变交叉敏感^[4]等问题进行了大量细致的研究工作,提出了各种温度增敏^[5]和非敏感^[6]应用技术。然而,对FBG形成过程中紫外(UV)光热效应的影响的研究报道还很少,需要进一步的研究来提高光纤光栅的制作工艺。

收稿日期: 2011-07-08; 收到修改稿日期: 2011-08-09; 网络出版日期: 2011-10-17

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2010FM039)资助课题。

作者简介: 宋志强(1982—),男,硕士,助理研究员,主要从事光纤传感技术方面的研究。E-mail: zhiqiangs@gmail.com

目前,工业化的光纤光栅生产主要是用紫外激光在光敏光纤上干涉曝光产生折射率周期性调制而形成 FBG,光栅波长选择性能的强弱主要由曝光条件来决定。实验发现,即使在相同的曝光量下,曝光强度、曝光速度等参数设置的不同也会对 FBG 的布拉格波长、反射率和光谱形状等带来很大的影响。本文利用相位掩模板法,采用直接曝光和扫描曝光两种方式,对光纤光栅制作过程中由于紫外光热效应的累积和传递对光栅生长过程和结果的影响进行了实验研究和分析。

2 实 验

采用准分子激光器和相位掩模板构建光纤光栅制作系统,具有成栅速度快、成品率高、一致性好和灵活方便等优点,是大批量制作 FBG 最常用的方式。使用 Coherent BraggStar Industrial 248 nm 准分子激光器作为紫外光源,其输出光为尺寸 $6\text{ mm} \times 3\text{ mm}$,发散角 $2\text{ mrad} \times 1\text{ mrad}$ 的光斑。通过外部光路可以将激光整形扩束,直接经相位掩模板在光敏光纤上曝光制作 FBG,如图 1(a)所示。这种方式适合于大批量的生产,并且光栅光谱具有高斯型切趾的特点^[7];也可以将光束会聚成能量密度较大的光斑或用光阑截取中间能量分布均匀的光斑,采用移动光束或光敏光纤的方式进行扫描曝光,如图 1(b)所示。这种方式适合于制作不同长度或折射率调制不连续的光栅,如相移光栅^[8]等。

相位掩模板法制作光纤光栅,布拉格波长取决于相位掩模板的周期(为光栅周期的 2 倍),光栅反射率和带宽则由曝光强度和光栅长度等参数决定^[9]。为了保证实验结果的可对比性,实验中均采用 Ibsen 1078 nm 周期的相位掩模板,宽带光源采用自制的掺铒光纤放大自发辐射(ASE)光源,采用分辨率为 0.02 nm 的 YOKOGAWA AQ6370 光谱仪(OSA)记录光纤光栅的透射谱和反射谱,光敏光纤为普通单模光纤经 12 MPa 压强的氢气常温载氢 14 天制得。经过多次实验测试,所搭建的光栅制作系统具有良好的重复性和一致性。

3 结果及分析

图 1(a)所示采用相位掩模板直接曝光的方式是目前工业化生产 FBG 的常用方法,预先设定好合适的曝光参数后,可快速的重复制作。但在制作过程中,当曝光一定的脉冲后若光栅反射率较弱,在相同位置继续曝光会发现,反射率不一定继续增长,前一次曝光形成的光栅会被“漂白”。对此现象,设定准分子激光器脉冲能量 8 mJ ,以 200 Hz 重复频率进行 6 次重复曝光实验,实验结果如图 2 所示。图 2 中分别记录了不同曝光时间间隔下,从未曝光到累计 1200 次脉冲曝光后的光栅透射谱。可以看出,在这种不连续的曝光方式下出现了明显的光栅被“漂白”现象,并且随着两次曝光时间间隔不同,光栅反射率的变化规律也不一样,在相同的曝光强度下,时间间隔越短,“漂白”的过程也越长。

同样的曝光方式和曝光参数下,记录了光栅布拉格波长 λ_B 的变化情况,如图 3 所示。实验发现,尽管随着曝光次数的增加,光栅反射率不会一直增长,但 λ_B 会近似线性的变大,这是由于曝光量的增大,使得光纤有效折射率 n_{eff} 也在增大,因此 λ_B 向长波长移动。同时,比较每次曝光后即时记录的 λ_B 和稍后(光谱仪重复扫描两次的时间)记录的波长数据,发现停止曝光后光栅波长会迅速减小约 0.2 nm ,这说明由于紫外光的照射,使得光纤的温度比室温至少提高了 $20\text{ }^\circ\text{C}$ ^[5]。

依然采用上述的曝光方式,设定激光脉冲能量 8 mJ ,以 $200, 300, 400$ 和 600 Hz 重复频率曝光 1200 次分别进行 4 次实验,观察不同曝光速度下光栅反射率的变化情况,实验结果如图 4 所示。从图 4 中可以看出,尽管曝光量相同,但随着曝光频率(曝光速度)的不同,光栅反射率会不一样,曝光速度越快,所形成的光

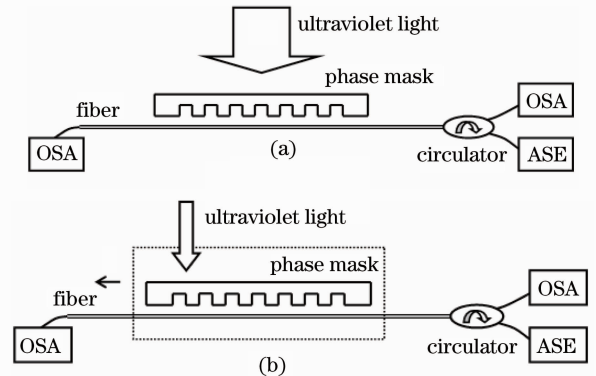


图 1 光纤布拉格光栅(FBG)制作系统。

(a)直接曝光;(b)扫描曝光

Fig. 1 Fiber Bragg grating (FBG) writing system.

(a) straight exposure; (b) scanning exposure

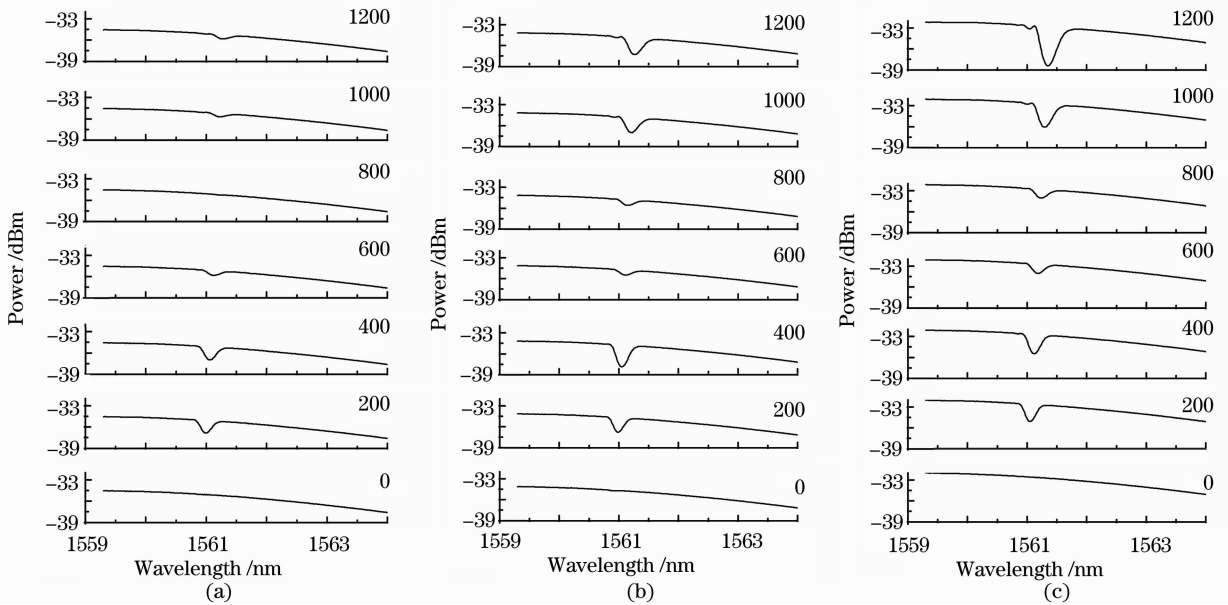


图2 8 mJ 脉冲能量,200 Hz 频率,每次 200 个脉冲累加曝光下反射率变化,曝光时间间隔为 (a) 5 s; (b) 15 s; (c) 25 s
Fig. 2 Reflectivity evolution with 200 pulse exposal every time of 8 mJ 200 Hz for 6 times of interval (a) 5 s; (b) 15 s; (c) 25 s

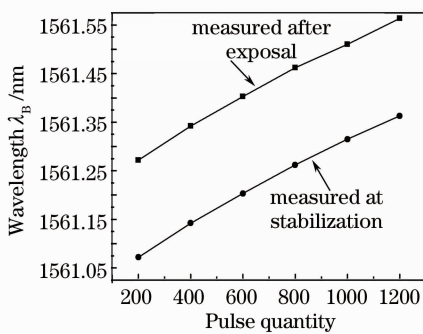


图3 8 mJ 脉冲能量,200 Hz 频率,每次 200 个脉冲累加曝光下布拉格波长变化

Fig. 3 Bragg wavelength change with 6 exposures of 200 pulses at 8 mJ and 200 Hz

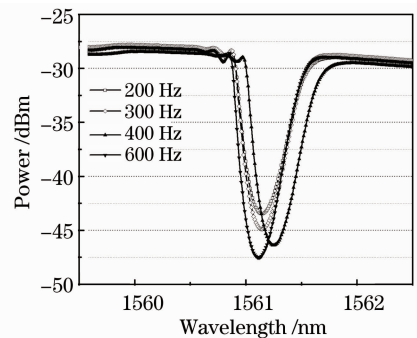


图4 8 mJ 脉冲能量,不同重复频率下 1200 个脉冲曝光后的透射谱

Fig. 4 Transmission spectrum with 1200 pulses exposures of 8 mJ and different frequency

栅反射率会越高。由于每次实验放置光纤时,预施加拉力等条件会略有不同,实验结果未能说明不同频率曝光时光栅布拉格波长的变化是否为线性。

以上实验结果说明,在光栅制作过程中紫外光的热效应会在光纤上累积,并影响光栅的生长。相位掩模板直接曝光制作光纤光栅的过程,可以认为是重复曝光使光纤有效折射率不断变大,从而光栅布拉格波长和反射率均不断增长的过程。但由于有效折射率和光栅的周期会被应力、应变和温度变化所影响,紫外光热效应的不断累积会使得有效折射率变大的同时,光栅周期也在变化,造成光栅耦合模的不稳定。因此,直接曝光制作光纤光栅时,应尽量缩短曝光时间,并采取一次充分曝光成栅,使紫外光热效应的影响降到最低。

采用图 1(b)扫描曝光方式制作光纤光栅时,发现扫描方向的不同会对光栅旁瓣的分布造成影响。采用宽度为 1 mm 的光阑截取光束中间最亮的光斑作为光源,设定脉冲能量 6 mJ,重复频率 20 Hz,以 0.05 mm/s 的速度移动光纤和相位掩模板进行曝光,由于光纤各处曝光强度一样,这种方式制作的光栅应为均匀光栅。定义从靠近 ASE 和 OSA 组成的测试系统的位置向外移动曝光为正方向,反之为反方向,图 1(b)所示扫描曝光方向为反方向。图 5 记录了两种扫描曝光方向光栅反射谱的生长过程。从中发现,实际制作的光栅不具有对称分布的旁瓣,并不是严格意义上的均匀光栅^[10],并且由于曝光方向的不同,其旁瓣分布也不同。正向移动

曝光时,旁瓣主要分布在长波长侧,而反向移动曝光时,旁瓣主要分布在短波长侧。这是由于紫外光热效应的累积和传递,在光栅生长过程中产生了“热致啁啾”。正向移动曝光时,在靠近测试端一侧先形成的光栅由于热效应周期变大,布拉格波长变长,而即时曝光点位置的光栅周期仍为掩模板周期 2 倍,因此光谱上反映出的现象类似于从大周期到小周期方向扫描刻写啁啾光栅的过程,反向移动曝光时的规律和现象则正好相反,因此两种曝光方式下所形成的光栅具有不同的旁瓣分布。随着光栅曝光长度的逐渐变长(大于 10 mm),光栅旁瓣的非对称性都将会变得不再明显,光栅会成为具有一定宽度的全反射型光栅。

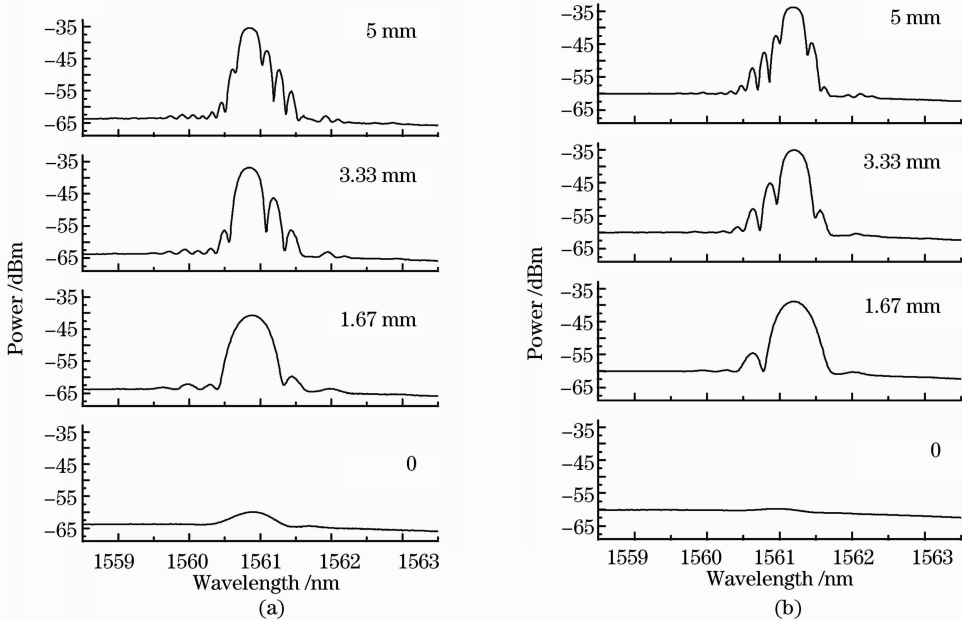


图 5 6 mJ 脉冲能量, 20 Hz 频率, 0.05 mm/s 速度扫描曝光, 不同光栅长度时反射谱变化。(a) 正向移动; (b) 反向移动
Fig. 5 Reflection spectrum evolution at different FBG length with 6 mJ 20 Hz 0.05 mm/s speed scanning exposure

(a) Forward moving; (b) backward moving

4 结 论

本文利用准分子激光器相位掩模板法对光纤光栅的生长过程进行了实验研究。研究表明,直接曝光法中,曝光时间是影响光栅制作效率的重要因素,同样的曝光量下,曝光时间越短,则光栅反射率越高;扫描曝光法中,曝光方向的不同会使得光栅旁瓣分布规律不同。实验结论说明,紫外激光的热效应对 FBG 的生长过程和结果产生影响,由于热效应的存在,光栅制作过程中会出现“漂白”和“热致啁啾”的现象。迄今为止,人们已提出了多种光纤光栅的制作方法,但要简单快速地制作出理想谱形的光栅仍然具有一定的难度,因此需要对光纤光栅的制作工艺进行更深入的研究和探讨。

参 考 文 献

- 1 Wang Wenhua, Song Shide, Wang Xiaoxu *et al.*. Study on temperature characteristic of fiber Bragg grating [J]. *J. Optoelectronics Laser*, 2005, **16**(7): 806~808
王文华, 宋世德, 王晓旭 等. 光纤布拉格光栅的高温特性研究[J]. *光电子激光*, 2005, **16**(7): 806~808
- 2 Jiang Desheng, Guo Mingjin, Yuan Hongcai *et al.*. Studies on properties of low temperature of fiber Bragg gratings [J]. *J. Optoelectronics Laser*, 2004, **15**(6): 660~662
姜德生, 郭明金, 袁宏才 等. 光纤 Bragg 光栅低温特性研究[J]. *光电子激光*, 2004, **15**(6): 660~662
- 3 Zhou Changzun, Chen Yang, P. Kung. Research on thermal stability of fiber Bragg gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(4): 434~437
周长尊, 陈 阳, Peter Kung. 布拉格光纤光栅热稳定性研究[J]. *光学学报*, 2003, **23**(4): 434~437
- 4 Zhang Bo, Yan Gaoshi, Deng Yijun. Cross-sensitivity of fiber grating sensor measurement [J]. *J. Applied Optics*, 2007,

28(5): 614~618

张 博, 严高师, 邓义君. 光纤光栅传感器交叉敏感问题研究[J]. 应用光学, 2007, **28**(5): 614~618

5 Zhan Yage, Cai Haiwen, Xiang Shiqing *et al.*. Study on high resolution fiber Bragg grating temperature sensor [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(1): 83~86

詹亚歌, 蔡海文, 向世清 等. 高分辨率光纤光栅温度传感器的研究[J]. 中国激光, 2005, **32**(1): 83~86

6 Cao Bin, Ou Pan, Jia Ming *et al.*. An innovative temperature-compensate package for fiber Bragg grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(12): 1960~1962

曹 彬, 欧 攀, 贾 明 等. 一种新型光纤光栅温度补偿装置[J]. 中国激光, 2008, **35**(12): 1960~1962

7 Wang Kun. Research of apodising functions of narrowband FBG filters [J]. *Optical Fiber & Electric Cable*, 2006, **2**: 22~26

王 昆. 窄带 FBG 滤波器切趾函数的研究[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2006, **2**: 22~26

8 Zhu Qing, Chen Xiaobao, Chen Jianping *et al.*. DFB fiber laser fabrication by moving phase mask [J]. *Optical Fiber & Electric Cable*, 2006, **1**: 17~21

朱 清, 陈小宝, 陈建平 等. 相位掩模板移动法制作 DFB 光纤激光器[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2006, **1**: 17~21

9 K. O. Hill, G. Meltz. Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1263~1276

10 Liu Changjun, Zhang Weigang, Jiang Meng *et al.*. Study on self-induced chirping for fiber Bragg grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1671~1674

刘长军, 张伟刚, 姜 萌 等. 光纤布拉格光栅自致啁啾效应的研究[J]. 光学学报, 2008, **28**(9): 1671~1674