

# 非线性二次曝光法制作三角形光纤 Bragg 光栅\*

张东生<sup>1,2</sup> 开桂云<sup>1</sup> 姜 莉<sup>1</sup> 董孝义<sup>1</sup>

(1 南开大学现代光学研究所, 天津 300071)

(2 武汉理工大学 光纤传感技术研究中心, 武汉 430070)

**摘 要** 提出了一种利用非线性二次曝光技术制作三角形光纤 Bragg 光栅的新方法. 该方法只使用普通 Bragg 位相模板, 采用两次曝光技术, 通过控制光纤光栅的本地谐振波长和反射率, 达到控制光纤光栅谱形的目的. 第一次直接对光纤曝光, 用来控制光纤光栅谐振波长; 第二次通过位相模板曝光, 用来控制光纤光栅的反射率. 考虑到光敏光纤感光特性曲线的多项 e 负指数变化规律, 按照“分步写入光纤光栅设计软件”进行曝光分布设计, 利用“分步曝光光纤光栅写入系统”进行曝光控制, 使用信息产业部第 46 研究所生产的 DCS-01 型光敏光纤, 得到了线性范围 1.24 nm、反射率为 0~64% 的三角形光纤 Bragg 光栅. 三角形光纤 Bragg 光栅作为光纤光栅传感解调器件, 在光纤传感领域具有重要应用价值.

**关键词** 光电子学; 光纤光栅; 三角形光纤 Bragg 光栅; 非线性; 二次曝光

**中图分类号** TN25 **文献标识码** A

## 0 引言

光纤光栅对温度、压力、应变敏感, 具有体积小、插入损耗低、与光纤兼容等优点, 在传感领域广泛应用<sup>[1~4]</sup>. 另外, 传感量以光信号的形式在光纤中传输, 不受电磁干扰, 可以在恶劣环境中工作, 因此, 光纤光栅传感具有广阔的发展前景. 在光纤光栅传感系统中, 波长解调问题一直是研究的主要问题, 人们提出了许多波长解调方案<sup>[5~7]</sup>, 主要分为匹配滤波解调和边沿滤波解调两类. 其中, 利用 F-P 滤波器和光纤光栅的匹配滤波法解调, 需要对波长进行调谐, 解调速度慢, 结构复杂; 而利用光纤光栅反射(或透射)谱的边沿滤波解调, 是最为快捷、简便和可靠的方案. 边沿滤波解调又分为两种: 其一, 利用长周期光纤光栅透射谱的准线性区进行解调<sup>[8]</sup>. 但是, 长周期光栅对环境敏感, 不宜采用; 另一种方案, 就是利用三角形或三角形反射谱的光纤 Bragg 光栅进行边沿滤波解调. Bragg 光栅与长周期光栅相比, 性能稳定. 关于三角形 Bragg 光栅的研制及其在传感解调方面的研究工作, 已有文献报道<sup>[9,10]</sup>.

本文提出了利用非线性二次曝光技术制作三角形光纤 Bragg 光栅的新方法, 在制作三角形光纤光栅时, 通过分步写入和两次曝光达到控制光栅谱形的目的. 利用二次曝光技术<sup>[11]</sup>, 同时考虑到光敏光纤感光特性曲线的多项 e 负指数变化规律<sup>[12]</sup>, 把曝

光量扩大到感光特性曲线的非线性区, 可将光谱的三角形变化范围尽可能的扩大. 我们根据自行编写的“分步写入光纤光栅设计软件”进行曝光设计, 利用自行研制的“分步曝光光纤光栅写入系统”进行曝光控制, 使用信息产业部第 46 研究所生产的 DCS-01 型光敏光纤, 得到了底部变化范围 1.24 nm、反射率 0~64% 的三角形 Bragg 光栅.

## 1 原理

均匀光纤 Bragg 光栅的谐振波长和峰值反射率分别由下列公式描述<sup>[13]</sup>

$$\lambda = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (1)$$

$$r_{\text{max}} = \tanh^2\left(\frac{\pi L}{\lambda} \nu \overline{\delta n_{\text{eff}}}\right) \quad (2)$$

式中,  $\lambda$  为光栅的峰值波长,  $n_{\text{eff}}$  为光栅的有效折射率,  $\Lambda$  为光栅的周期.  $r_{\text{max}}$  为光栅的峰值反射率,  $\nu$  和  $L$  为光栅的调制系数和长度,  $\overline{\delta n_{\text{eff}}}$  为形成光栅的有效折射率增量的平均值. 有效折射率增量与曝光量的变化关系由式(3)确定<sup>[12]</sup>

$$\overline{\delta n_{\text{eff}}} = \Delta n_{\text{max}} - \Delta n_1 e^{-c_1 t} - \Delta n_2 e^{-c_2 t} \quad (3)$$

式中,  $\Delta n_{\text{max}}$ 、 $\Delta n_1$ 、 $\Delta n_2$ 、 $c_1$ 、 $c_2$  是由光纤的光敏性所决定的, 可以通过实验测量得到.

三角形 Bragg 光栅是一种非均匀 Bragg 光栅, 它是由若干个长度相等的均匀子光栅组成, 每个子光栅的谐振波长和反射率线性递增, 三角形 Bragg 光栅的反射谱就是这些子光栅反射谱的叠加. 三角形 Bragg 光栅的制作需要经过两次曝光, 第一次直接对光敏光纤进行分步扫描曝光, 控制各子光栅的谐振波长; 第二次通过 Bragg 位相模板分步曝光, 控

\* 国家 863 高科技攻关基金(2002AA3110)、武汉理工大学博士启动基金资助项目  
Tel: 027-87651850-8104 Email: zhangdsem@sina.com.cn  
收稿日期: 2004-05-20

制各子光栅的反射率. 根据式(1)、(2)、(3), 利用自行编写的“分布写入光纤光栅设计软件”计算, 分别得到第一次和第二次的曝光分布曲线. 如图 1 和图 2. 按照图 1 和图 2 所示的曝光分布对光敏光纤两次曝光后, 就可以得到三角形光纤 Bragg 光栅, 其反射谱可由该软件进行模拟, 其模拟结果如图 3.

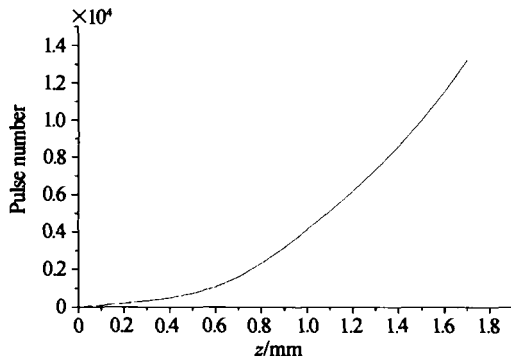


图 1 第一次曝光分布曲线  
Fig. 1 The distribution of the first exposure

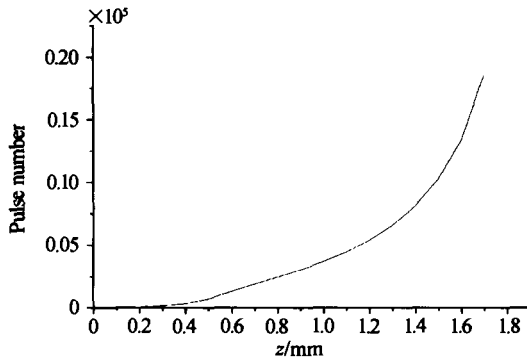


图 2 第二次曝光分布曲线  
Fig. 2 The distribution of the second exposure

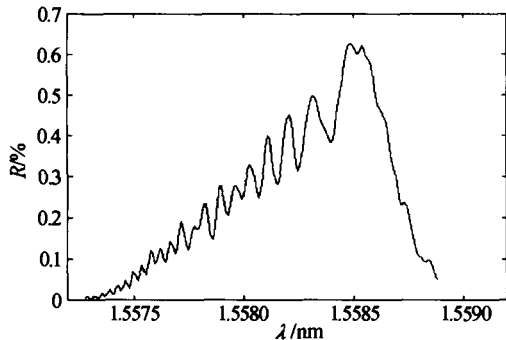


图 3 三角形光纤 Bragg 光栅模拟结果  
Fig. 3 Simulation result of the triangular fiber Bragg

## 2 实验与结果

“分步曝光光纤光栅写入装置”如图 4. 由 KrF 准分子激光器发出的波长为 248 nm、脉冲能量为 67.2 mJ 的脉冲激光, 经过柱透镜汇聚成与光纤方向一致的线状光斑, 光斑透过狭缝照在光敏光纤上. 狭缝宽度为 1 mm, 用来限制光斑的长度. 位相模板和光纤固定在移动平台上, 移动平台可由步进电机控制上下移动, 每次移动 1 mm, 移动精度达到

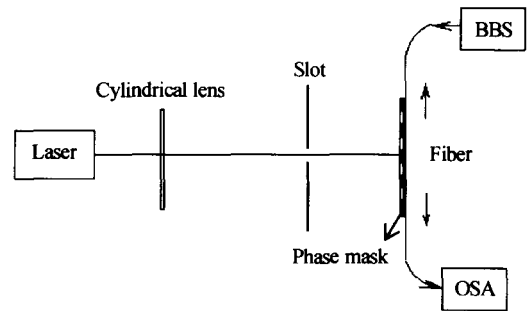


图 4 分步曝光光纤光栅写入系统示意图  
Fig. 4 The scanning system for fabricating fiber gratings

1 μm. 光敏光纤是由信息产业部第 46 研究所生产的 DCS-01 型, 通过谐振波长法测定; 其光致折射率增量随曝光量的变化关系为

$$\delta n_{\text{eff}} = 1.6971 \times 10^{-3} - 1.3023 \times 10^{-3} e^{-0.00007t} - 3.404 \times 10^{-4} e^{-0.00217t} \quad (4)$$

光敏光纤曝光部分总长度为 18 mm, 分成 18 段, 每段上的曝光量由激光的脉冲次数计量. 首先拿掉位相模板, 按照图 1 的曝光分布直接对光纤曝光, 得到折射率沿光纤方向的线性递增分布; 然后, 放上位相模板进行光栅曝光, 曝光分布由图 2, 光栅的制作过程由宽带光源 BBS 和光谱仪 OSA 组成的系统进行在线监测. 曝光结束后, 得到的啁啾光栅的透射谱如图 5. 结果显示: 三角形光纤 Bragg 光栅透射谱的三角形部分带宽 1.24 nm, 反射率为 0~64%.

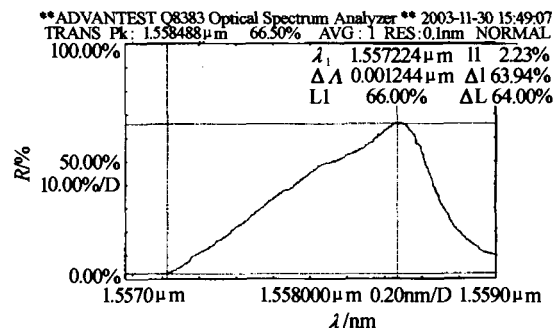


图 5 三角形光纤 Bragg 光栅反射谱  
Fig. 5 The reflection spectrum of the triangular fiber Bragg

## 3 结论

本文提出了利用非线性二次曝光技术制作三角形光纤 Bragg 光栅的新方法. 该方法通过两次曝光, 分别对光纤光栅的本地波长和反射率进行控制, 以达到对光纤光栅谱形控制的目的. 在曝光过程中, 考虑到光敏光纤感光特性曲线的多项 e 负指数变化规律, 根据“分步写入光纤光栅设计软件”进行曝光设计, 利用“分步曝光光纤光栅写入系统”进行曝光控制, 得到了三角形光纤 Bragg 光栅, 其底部线性变化范围 1.24 nm, 反射率 0~64%. 实验结果与理论模拟一致. 本文制作三角形 Bragg 光栅, 仅需要控制 Bragg 光栅反射谱线的一条边为斜线, 比其

它制作三角形 Bragg 光栅的方法简便。

### 参考文献

- 1 Rao Y J. In-fibre Bragg grating sensors. *Meas Sci Technol*, 1997, **8**(4):355~375
- 2 柳春郁, 余有龙, 张昕明, 等. 基于悬臂梁调谐技术的光纤光栅无源振动监测. *光子报学*, 2003, **32**(9):1067~1069  
Liu C Y, Yu Y L, Zhang X M, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(9):1067~1069
- 3 Guan B O, Yan H Y, Tao X M, *et al.* Simultaneous strain and temperature measurement using a single fiber Bragg grating. *Electron Lett*, 2000, **26**(12):1018~1019
- 4 张向东, 李育林, 彭文达, 等. 光纤光栅型温湿度传感器的设计与实现. *光子学报*, 2003, **32**(10):1166~1169  
Zhang X D, Li Y L, Peng W D, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(10):1166~1169
- 5 Davis M A, Kersey A D. Matched-filter interrogation technique for fiber Bragg grating arrays. *Electron Lett*, 1995, **31**(10):822~825
- 6 詹亚歌, 陆青, 向世清, 等. 优化光纤光栅传感器匹配光栅解调方法的研究. *光子学报*, 2004, **33**(6):712~715  
Zhan Y G, Lu Q, Xiang S Q, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(6):712~715
- 7 Brady G, Kalli K, Webb D J, *et al.* Simultaneous interrogation of interferometric and Bragg grating sensors. *Opt Lett*, 1995, **20**(11):1340~1342
- 8 Liu B, Tong Z R, Chen S H, *et al.* A novel method of edge filter linear demodulation using long period grating in fiber sensor system. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(Supplement):857~858
- 9 Feced R, Zervas M N J. Efficient inverse scattering algorithm for the design of grating-assisted codirectional mode couplers. *Opt Soc Am A*, 2000, **17**(9):1573~1581
- 10 Huang R, Zhou Y W, Sun G W, *et al.* A novel fiber Bragg grating with triangular spectrum and its application in strain sensor. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(Supplement):787~788
- 11 Hill K O, Bilodeau F, Malo B, *et al.* Chirped in-fiber Bragg gratings for compensation of optical fiber dispersion. *Opt Lett*, 1994, **19**(17):1314~1316
- 12 张东生, 姜莉, 张伟刚, 等. 长周期光纤光栅谐振波长与曝光量变化关系的研究. *物理学报*, 2003, **52**(12):3087~3091  
Zhang D S, Jiang L, Zhang W G, *et al.* *Acta Phys Sin*, 2003, **52**(12):3087~3091
- 13 Erdogan T. Fiber grating spectra. *J Lightwave Technol*, 1997, **15**(8):1277~1294

## Fabricating Fiber Bragg Gratings with Triangular Spectrum Using Nonlinear Double-Exposure

Zhang Dongsheng<sup>1,2</sup>, Kai Guiyun<sup>1</sup>, Jiang Li<sup>1</sup>, Dong Xiaoyi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071

<sup>2</sup> Fiber Optic Sensing Technology Research Centre, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070

Received date: 2004-05-20

**Abstract** In this paper, a novel nonlinear double-exposure technique for fabricating fiber Bragg gratings with triangular spectrum is proposed. The spectrum of fiber Bragg grating can be controlled by double exposure technique. The first exposure is used to control the resonant wavelength of fiber grating by directly irradiating the naked photosensitive fiber. The second one is to form the grating to control its reflectivity through an ordinary Bragg phase mask. Considering the multi-decaying-exponential relationship between photo-induced index increment of photosensitive fiber and its irradiating dose, nonlinear double-exposure profiles are calculated by our self-designed software. The triangular fiber Bragg grating is obtained with DCS-01 photosensitive fiber by using a scanning system. As a result, the bottom width and the reflectivity of the grating is 1.24 nm and 0~64%, respectively. As a demodulation device, a triangular fiber Bragg gratings is very important in a fiber grating sensing system.

**Keywords** Optoelectron optics; Fiber grating; Triangular fiber Bragg grating; N nonlinear; Double-exposure



**Zhang Dongsheng** was born in 1964 in Liao Nin Province and received Ph. D. from Institute of Modern Optics of Nankai University in 2004. Now he is working in Fiber Optic Sensing Technology Research Centre, Wuhan University of Technology. He is interested in the research of fiber grating sensors and their applications.