

基于动态相位掩模板法的啾啾光纤光栅的制作

吕京生¹, 宋志强¹, 祁海峰¹, 倪家升¹, 王 昌^{1*}, 王洪忠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胜利油田新胜石油物探技术服务有限责任公司, 山东 东营 257000

摘要 提出了一种利用均匀相位掩模板制作啾啾光纤光栅(FBG)的方法。在对光纤的扫描曝光过程中,相位掩模板沿长度方向周期性抖动,且抖动幅度随光栅扫描长度的变化而变化,使FBG的相位随着掩模板位置的变化而变化,实现了FBG周期的线性调制,从而得到线性啾啾FBG。掩模板抖动振幅的变化规律决定了FBG的啾啾系数。设计了3种不同的相位掩模板抖动函数,实验制作了不同啾啾量的FBG。

关键词 光纤光学; 啾啾光纤光栅; 相位掩模板; 抖动

中图分类号 O436.1 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP54.020603

Chirped Fiber Grating Fabrication Based on Dynamic Phase Mask Method

Lü Jingsheng¹, Song Zhiqiang¹, Qi Haifeng¹, Ni Jiasheng¹,

Wang Chang¹, Wang Hongzhong²

¹Key Laboratory of Optical Fiber Sensing Technology of Shandong Province, Laser Institute of Shandong Academy of Sciences, Jinan, Shandong 250014, China;

²Xinsheng Petroleum Exploration Technology Service Company of Shengli Oilfield, Dongying, Shandong 257000, China

Abstract A method for chirped fiber Bragg grating (FBG) fabrication using an uniform phase mask is proposed. In the scanning exposure process, the phase mask jitters periodically along the length direction, and the jittering amplitude varies with the grating scanning length, which causes the phase of FBG changing with the position of the mask. As a result, the period of FBG is modulated linearly, and a linearly chirped FBG is obtained. The chirped coefficient of FBG is determined by the variation of the jittering amplitude of phase mask. Three different jittering functions of phase mask are designed, and FBGs with different chirp values are fabricated in experiment.

Key words fiber optics; chirped fiber grating; phase mask; jittering

OCIS codes 060.2340; 060.3745; 060.3738

1 引言

光纤光栅(FBG)作为一种带阻滤波器,具有插入损耗低、工作波长范围广、系统兼容性好以及制造成本低等优点,在光纤通信、光纤传感和光纤激光器等方面具有重要的应用价值。FBG的种类众多,啾啾FBG是一种变周期(T)的光栅器件,具有宽阻带和时延补偿的特点,被广泛用作光纤滤波器^[1-3]和色散补偿器^[4-6]。啾啾FBG的制作方法很多^[7-8],采用啾啾相位掩模板制作啾啾FBG是一种稳定高效的方法,但是该

收稿日期: 2016-09-19; 收到修改稿日期: 2016-10-24

基金项目: 国家自然科学基金(61605103)、山东省重点研发计划(2015GGX101001)、山东省自主创新及成果转化专项(14ZZCX04206)

作者简介: 吕京生(1980—),男,硕士,助理研究员,主要从事光纤光栅和光纤传感器方面的研究。

E-mail: mmsunnyboy@163.com

* 通信联系人。E-mail: wang960100@163.com

方法的加工工艺难度大,价格贵,啁啾量固定,使用不灵活,限制了啁啾相位掩模板的实用化。为此,研究人员提出了多种利用均匀相位掩模板来制作啁啾 FBG 的方法。李彬等^[9]提出将光纤弯曲,通过改变光纤与掩模板之间的距离,可使 FBG 的周期产生轴向渐变,从而产生啁啾;但是,该方法中的光纤曲率很难控制,重复性和可靠性无法保证。简水生等^[10-11]利用锥形悬臂梁对贴于其上的 FBG 产生不同的弯曲应变,从而使光栅产生啁啾效应,但该方法无法使啁啾谱形保持在光栅上,因此其应用受到限制。

本文提出了一种基于均匀相位掩模板的啁啾 FBG 的制作方法,在光纤扫描曝光过程中,通过对相位掩模板的位置进行规律性调制,使得光栅相位随掩模板位置的变化发生相应的变化,实现了光栅周期的线性调制,从而能够刻写啁啾 FBG。

2 制作原理

表征 FBG 轴向折射率分布的公式为

$$n(z) = n_0 + \overline{\Delta n_{\text{eff}}(z)} \left\{ 1 + \nu(z) \cos \left[\frac{2\pi}{\Lambda} z + \varphi(z) \right] \right\}, \quad 0 < z < L, \quad (1)$$

式中 n_0 为光纤纤芯的原始折射率; $\overline{\Delta n_{\text{eff}}(z)}$ 为紫外(UV)曝光引起折射率变化的直流分量,是折射率变化量的平均值; $\nu(z)$ 为折射率变化条纹的可见度,代表光致折射率调制交流分量的振幅变化; Λ 为光栅周期; L 为光栅长度; $\varphi(z)$ 用来描述沿光纤轴向光栅相位的变化量,代表 FBG 的啁啾情况。

理想情况下,对于均匀 FBG,可认为 UV 曝光引起的折射率变化的平均量为常数,且(1)式中 $\nu(z) = 1$, $\varphi(z) = 0$, 则光栅折射率调制的交流分量可简单表示为 $\cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda}z\right)$ 。

对于线性啁啾 FBG,其周期随着光纤长度 z 的变化而变化,此时周期可表示为

$$\Lambda' = \frac{\Lambda}{1 + F \frac{z}{L}}, \quad 0 < z \leq L, \quad (2)$$

式中 F 为啁啾系数。将(2)式代入 $\cos(2\pi z/\Lambda)$, 则光栅折射率调制的交流分量变为

$$\cos \frac{2\pi z}{\Lambda'} = \cos \left[\frac{2\pi z}{\Lambda} \left(1 + F \frac{z}{L} \right) \right] = \cos \left(\frac{2\pi z}{\Lambda} + F \frac{2\pi z^2}{\Lambda L} \right). \quad (3)$$

由(3)式可知,线性啁啾 FBG 也可以看作是由周期为 Λ 的均匀光栅相位随 z 持续变化而得到的,相位变化规律为

$$\varphi(z) = F \frac{2\pi z^2}{\Lambda L}, \quad 0 < z \leq L. \quad (4)$$

在均匀 FBG 扫描曝光过程中,若相位掩模板在垂直于掩模条纹的方向以函数 $z_0(t)$ 沿光纤抖动,则一个周期内光栅折射率调制的交流分量振幅可表示为^[12]

$$\frac{1}{T} \int_0^T \cos \left\{ \frac{2\pi}{\Lambda} [z - z_0(t)] \right\} dt = A \cos \left(\frac{2\pi}{\Lambda} z \right) + B \sin \left(\frac{2\pi}{\Lambda} z \right) = \sqrt{A^2 + B^2} \cos \left[\frac{2\pi}{\Lambda} z + \arctan(B/A) \right], \quad (5)$$

式中

$$A = \frac{1}{T} \int_0^T \cos \left[\frac{2\pi}{\Lambda} z_0(t) \right] dt, \quad B = \frac{1}{T} \int_0^T \sin \left[\frac{2\pi}{\Lambda} z_0(t) \right] dt. \quad (6)$$

由(3)、(5)式可知,由于相位掩模板的抖动,FBG 的折射率调制的交流分量的变化量 $\nu(z) = \sqrt{A^2 + B^2}$, 相位变化系数 $\varphi(z) = \arctan(B/A)$ 。理论上,通过改变抖动函数 $z_0(t)$,可以得到任意切趾函数和啁啾系数的 FBG。

3 制作系统及实验

依据上述原理,搭建了利用动态相位掩模板法制作 FBG 的系统,如图 1 所示。采用扫描曝光法的基本光路,利用直线运动平台带动 UV 光束来扫描曝光光纤,由高精度压电陶瓷促动器(PZT)控制相位掩模板的抖动,直线运动平台和 PZT 均通过计算机程序同步控制。利用自主开发的 FBG 模拟软件,根据所要制作的

FBG 的切趾函数和啁啾系数,生成相位掩模板(即 PZT)的抖动函数,再由计算机程序计算得到扫描曝光过程中 PZT 的实时电压信号,将该电压信号并施加给 PZT,从而实现 FBG 的切趾或啁啾。

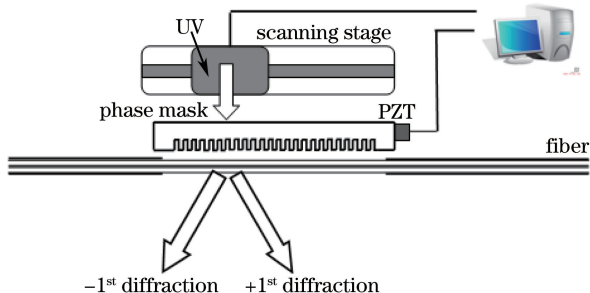


图 1 利用动态相位掩模板法制作 FBG 的系统

Fig. 1 FBG fabrication system with dynamic phase mask method

根据传输矩阵模型^[13],任意 FBG 可以等效为若干段均匀 FBG 的叠加,具有不同折射率调制量和不同相位的子光栅可以组合成不同的 FBG。据此,开发了界面如图 2 所示的 FBG 模拟软件,它可以设定光栅折射率的交流调制函数、直流调制函数、光栅长度、光栅分段数以及光栅啁啾等参数,设计结果以二维数组的形式输出,如表 1 所示。表 1 中第 1 列为行数,代表光栅分成的 N 段均匀子光栅;第 2 列为交流调制幅度,用 AC 表示,数值为 $0\sim 1$,代表干涉条纹的对比度;第 3 列为相位量,代表某段子光栅的相位;第 4 列为直流调制幅度,用 DC 表示,数值为 $0\sim 1$,由有效曝光量决定。在 FBG 的制作过程中,由计算机程序调用数组文件,根据第 2、3 列数值计算得到制作每段子光栅时相位掩模板的抖动函数 $z_0(t)$,从而实现所设计的 FBG 的制作。

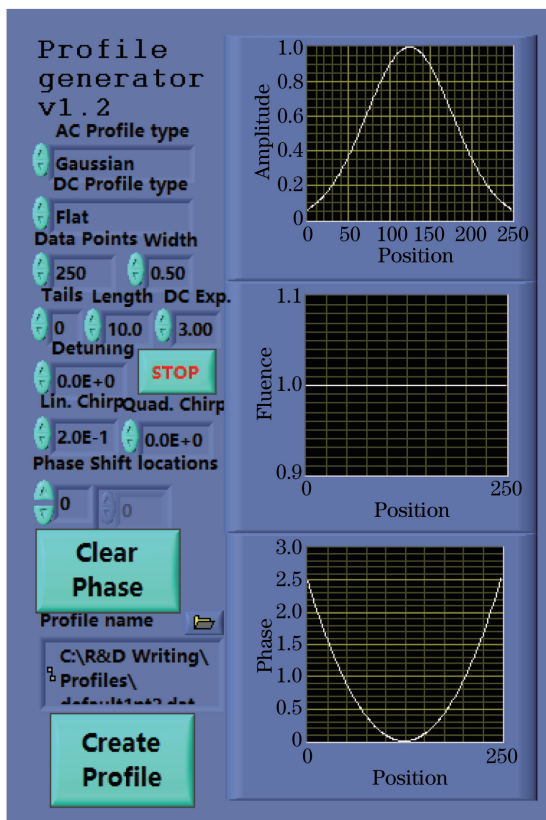


图 2 FBG 的设计软件界面

Fig. 2 Interface of FBG design software

表1 FBG 的设计结果
Table 1 Design results of FBG

No.	AC	Phase	DC
0	0.425	2.480	1
1	0.431	2.440	1
2	0.437	2.401	1
3	0.443	2.361	1
⋮	⋮	⋮	⋮
N	0.425	2.480	1

设计了3种不同相位变化量的光栅制作参数,直流和交流折射率调制幅度均设为1,即光栅为均匀啁啾光栅,FBG的相位随光栅位置的变化曲线如图3(a)所示。实际制作的光栅长度均为10 mm,采用相同的曝光量制作了3种啁啾FBG,如图3(b)所示。从图中可以看出,相比普通FBG,所制作的3种光栅的谱宽明显更宽,并且随着光栅相位变化的加剧,光栅谱宽依次变宽,同时反射峰平坦度降低,这种现象完全符合啁啾FBG的制作规律,说明此方法能够成功地制作啁啾FBG。

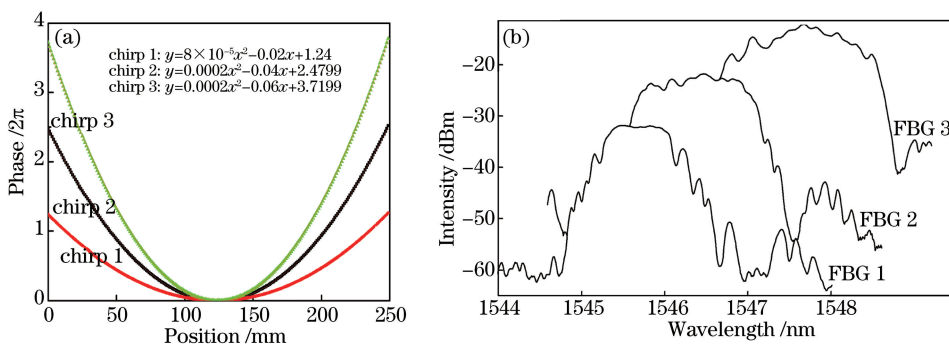


图3 啁啾光栅的(a)相位变化及(b)反射谱

Fig. 3 (a) Phase variation and (b) reflective spectrum of chirped FBG

4 结 论

针对啁啾FBG制作中存在的掩模板成本高、制作不灵活的问题,提出了一种利用均匀相位掩模板制作啁啾FBG的方法。在扫描曝光FBG制作工艺中,相位掩模板沿长度方向周期性抖动,且抖动幅度随光栅扫描长度的变化而变化,使得光栅相位发生规律性变化,实现了光栅周期的线性变化,产生了FBG的啁啾效应。所提方法使得FBG的制作更加灵活,具有很好的可设计性。最后,通过实验验证了此方法的可行性。

参 考 文 献

- [1] Jiang Meng, Zhang Weigang, Jin Long, *et al.* Wavelength tunable band-pass filter based on chirped fiber grating[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(4): 873-878.
姜 萌, 张伟刚, 金 龙, 等. 基于啁啾光纤光栅的波长可调谐带通滤波器[J]. 中国激光, 2009, 36(4): 873-878.
- [2] Du Huajie, Yu Yongsan, Zheng Jie, *et al.* Design and fabrication of gain flattening filters for EDFA with chirped fiber Bragg gratings[J]. Journal of Optoelectronics•Lasers, 2007, 18(6): 645-648.
杜华杰, 于永森, 郑 杰, 等. 啁啾光纤光栅 EDFA 增益平坦滤波器的设计与制作[J]. 光电子·激光, 2007, 18(6): 645-648.
- [3] Wang Zhaokun, Du Songtao, Wang Ziwei, *et al.* Passive mode-locked Yb-doped laser based on chirped fiber Bragg grating[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(8): 0802002.
王兆坤, 杜松涛, 王子薇, 等. 基于啁啾光纤光栅的被动锁模掺 Yb 激光器[J]. 中国激光, 2014, 41(8): 0802002.
- [4] Tan Zhongwei, Ni Tigang, Liu Yan, *et al.* Application of dispersion compensator based on chirped fiber gratings in ultra long-haul DWDM system[J]. Acta Physica Sinica, 2006, 55(6): 2799-2804.
谭中伟, 宁提纲, 刘 艳, 等. 基于啁啾光纤光栅的色散管理[J]. 物理学报, 2006, 55(6): 2799-2804.
- [5] Yu Juntao, He Hongye. Study on chromatic dispersion compensation with chirped fiber gratings[J]. Study on Optical

- Communications, 2009, 35(2): 14-15.
- 于俊婷, 何宏业. 基于啁啾光纤光栅色散补偿问题的思考[J]. 光通信研究, 2009, 35(2): 14-15.
- [6] Wu Qiang, Yu Chongxiu, Yao Deqi, *et al.* Research of the chromatic dispersion compensation method based on chirped fiber Bragg gratings[J]. Study on Optical Communications, 2003(6): 43-45.
- 吴 强, 余重秀, 姚德启, 等. 啁啾光纤光栅色散补偿方案研究[J]. 光通信研究, 2003(6): 43-45.
- [7] He Wei. The fabrication methods of chirped fiber Bragg gratings[J]. Industrial Control Technique, 2005(7): 93-95.
- 何 伟. 啁啾光纤光栅制作方法[J]. 工业控制技术, 2005(7): 93-95.
- [8] Xu Ou, Lu Shaohua, Dong Xiaowei, *et al.* Research progress for filters based on superimposed chirped fiber Bragg gratings[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2007, 44(3): 63-68.
- 许 鸥, 鲁韶华, 董小伟. 重叠写入啁啾光纤光栅型滤波器的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2007, 44(3): 63-68.
- [9] 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.
- [10] Jian Shuisheng, Zhao Yucheng, Wei Daoping, *et al.* Dispersion compensation experiment of single mode optical fiber using chirped and wavelength tunable fiber Bragg grating[J]. Science in China (Series E), 1999, 29(2): 124-130.
- 简水生, 赵玉成, 魏道平, 等. 利用啁啾和波长同时可调谐的光纤光栅进行单模光纤色散补偿实验[J]. 中国科学(E 辑: 技术科学), 1999, 29(2): 124-130.
- [11] Yu Youlong, Liu Zhiguo, Guan Baiou, *et al.* Transforming a uniform fiber grating into a chirped one using a cantilever beam[J]. Chinese J Lasers, 1999, 26(10): 912-916.
- 余有龙, 刘志国, 关柏鸥, 等. 利用悬臂梁将均匀周期光纤光栅变为啁啾光纤光栅[J]. 中国激光, 1999, 26(10): 912-916.
- [12] Poladian L, Ashton B, Padden W E, *et al.* Characterization of phase shifts in gratings fabricated by over-dithering and simple displacement[J]. Optical Fiber Technology, 2003, 9(4): 173-188.
- [13] Erdogan T. Fiber grating spectra[J]. Journal of Lightwave Technology, 1997, 15(8): 1277-1294.