

文章编号: 0253-2239(2008)03-0414-05

利用均匀相位掩模板制作线性啾啾光纤光栅

李 彬^{1,2} 刘 艳^{1,2} 谭中伟^{1,2} 许 鸥^{1,2} 鲁韶华^{1,2} 简水生^{1,2}

(¹ 北京交通大学全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044)

² 北京交通大学光波技术研究所, 北京 100044

摘要 理论上分析并从实验上验证了一种利用均匀相位掩模板写入啾啾光纤光栅的方法: 将光纤弯曲, 由于光纤离掩模板的距离不同从而使光纤光栅的周期轴向渐变, 由此产生啾啾。分析了这种啾啾光纤光栅的谱特性和时延特性, 同时也分析了由于光纤离掩模板的距离不同而引起的折射率调制变化给光纤光栅特性带来的影响。设计了一种石英曲面, 利用其使光纤按照弯曲函数进行弯曲, 然后进行紫外曝光制成了线性的啾啾光纤光栅。实验中制作的啾啾光纤光栅色散值为 -1102 ps/nm, 纹波为 17ps。通过改变弯曲函数就可以实现利用一块均匀相位掩模板制作不同啾啾量的啾啾光纤光栅的目的, 降低了啾啾光纤光栅的制作成本。

关键词 光纤光学; 啾啾光纤光栅; 线性啾啾; 色散; 均匀相位掩模板; 紫外曝光

中图分类号 TN253 文献标识码 A

Linearly Chirped Fiber Gratings Using Uniform Phase Mask

Li Bin^{1,2} Liu Yan^{1,2} Tan Zhongwei^{1,2} Xu Ou^{1,2} Lu Shaohua^{1,2} Jian Shuisheng^{1,2}

(¹ Key Laboratory of All-Optical Network & Advanced Telecommunication Network, Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

² Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

Abstract A novel linearly chirped fiber grating was analyzed and fabricated by using uniform phase mask instead of chirped mask. The chirp of the grating is realized by precisely setting the distance between the fiber and the phase mask at every point of the fiber. The spectral characteristic and delay characteristic of such a chirped fiber grating were analyzed. And the influence on the grating by refractive index modulation variation caused by the variation of distance between the fiber and phase mask was also analyzed. In experiments we derived linearly chirped fiber grating by putting the fiber on the curved face behind the uniform phase mask to get ultraviolet light exposure. The fabricated chirped fiber grating has -1102 ps/nm dispersion, and time delay ripple of 17 ps. Gratings with different chirp with one uniform phase mask conveniently by only changing the curve function of the fiber, can be fabricated.

Key words fiber optics; chirped fiber grating; linear chirp; dispersion; uniform phase mask; ultraviolet exposure

1 引 言

高速光纤通信系统中, 啾啾光纤光栅是一种非常重要的色散补偿器件^[1~3]。一般在波分复用系统中作为色散补偿器件的啾啾光纤光栅都是利用线性变化的光栅周期而产生啾啾^[4]的。对于这种啾啾光纤光栅的制作, 主要采用相位掩模法, 因为用这种方法制作啾啾光纤光栅简单, 重复性好, 光栅性能良好。

而相位掩模板的造价非常昂贵, 因此, 降低啾啾光纤光栅的制作成本成为人们长久以来的研究目标^[5]。

对于在光纤光栅制作过程中产生啾啾, 主要是在写入过程中使有效折射率或光纤光栅周期轴向渐变而产生啾啾。本文提出的在弯曲光纤上写入啾啾光纤光栅就是利用了光纤离掩模板的距离不同从而使光栅的周期轴向渐变^[4,6], 该方法最早由 Sugden

收稿日期: 2007-05-15; 收到修改稿日期: 2007-09-17

基金项目: 国家自然科学基金(60607001)资助课题。

作者简介: 李 彬(1979—), 女, 河北人, 博士研究生, 主要从事光纤通信及光电子器件等方面的研究。

E-mail: 03111020@bjtu.edu.cn; jinjinlibin@163.com

导师简介: 简水生(1929—), 男, 江西人, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤通信、光纤传感、光纤有源无源器件、光纤网络等方面的研究。E-mail: ssjian@center.njtu.edu.cn

K 等提出,并且在实验上进行了初步验证。后来 Zhang Q 等又推导了产生线性啁啾、平方啁啾、平方根啁啾时光纤弯曲的曲线公式。但他们都没有分析这样制作的啁啾光纤光栅的时延特性,也没有测量啁啾光栅的色散。另外,由于光纤与掩模板的距离不同,从而引起的折射率调制也不同,由此产生的啁啾对光纤光栅特性的影响从未被提及,现有的研究是比较粗糙和初步的。本文据此进行详细的理论分析,同时在实验上也给出了更为充分的结果和测量数据。

2 基本理论

2.1 线性啁啾光纤光栅的理论

光纤光栅结构的产生是由于紫外光的照射引起纤芯折射率的周期性变化,纤芯有效折射率的调制形式可描述为^[7]

$$\delta n_{\text{eff}}(z) = \overline{\delta n_{\text{eff}}}(z) + \delta n_1(z) \cos\left[\frac{2\pi}{\Lambda(z)}z\right], \quad (1)$$

$$0 \leq z \leq L$$

其中 $\overline{\delta n_{\text{eff}}}$ 为纤芯折射率的“直流”调制量,即纤芯折射率的平均变化量, δn_1 为折射率调制的幅度, $\Lambda(z)$ 是光栅沿轴向的周期。

对于线性啁啾光纤光栅,其周期沿着光纤轴向是线性变化的:

$$\Lambda(z) = \Lambda_0(1 + az/L), \quad (2)$$

式中 Λ_0 为啁啾光纤光栅的初始周期, a 为啁啾系数, L 为光栅长度。

2.2 弯曲光纤改变光栅周期以及引起折射率调制变化的分析

如图 1 所示,将弯曲的光纤放置在相位掩模板后,紫外曝光时,沿轴向不同位置光纤弯曲的程度不

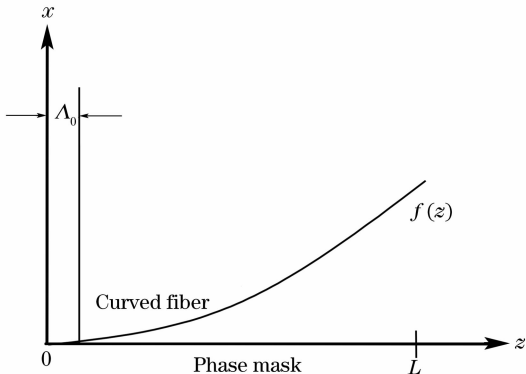


图 1 弯曲光纤与相位掩模板的几何关系

Fig. 1 Geometrical relationship of curved fiber and phase mask

同,由此产生光栅周期的变化。图中 z 方向是光纤未发生弯曲时的轴向,设光纤弯曲的曲线函数为 $f(z)$,从而弯曲光纤上的光栅周期可描述为^[4]

$$\Lambda(z) = \Lambda_0[1 + f'(z)^2]^{1/2}. \quad (3)$$

若要光栅周期发生线性变化,即得到线性啁啾,根据(2)式和(3)式,可解得函数 $f(z)$:

$$f(z) = \frac{L}{a} \left[\frac{1}{2}(1 + Z) \sqrt{Z(Z+2)} - \ln(\sqrt{Z+2} + \sqrt{Z}) + \ln\sqrt{2} \right], \quad (4)$$

式中 $Z = az/L$ 。

另外,由于弯曲光纤沿轴向不同位置与掩模板的距离不同,当紫外曝光时,纤芯上引起的折射率调制就不是常量,会引起啁啾。根据标量衍射理论对相位掩模近场光强进行研究,可以得到近场光强在轴向和纵向的分布^[8]。一般的,用于紫外曝光的光源只有有限的时空相干性,假定光源具有高斯型的光谱分布,1/e 点谱宽为 $2\Delta\lambda$,发散角为 $2\Delta\varphi$,在光垂直入射的情况下,可以得到相位掩模的近场光强分布为^[8-10]

$$I = \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \left\{ e_0 + \sum_{j=1}^K \sum_{i=0}^K 4 \sqrt{e_i e_j} \times \cos\left(\frac{2\pi z}{\lambda} \sin \psi_i - \frac{2\pi x \varphi}{\lambda} \tan \psi_i\right) \times \cos\left(\frac{2\pi z}{\lambda} \sin \psi_j - \frac{2\pi x \varphi}{\lambda} \tan \psi_j\right) \times \cos\left[\frac{2\pi x}{\lambda} (\cos \psi_i - \cos \psi_j)\right] \right\} d\varphi d\lambda, \quad (5)$$

其中

$$\psi_m = \arcsin\left(m \frac{\lambda}{\Lambda_{00}}\right) \quad (\text{光束的衍射角}), \quad (6)$$

$$m = 0, 1, 2, \dots$$

$$e_m(\varphi, \lambda) = e_{m0} \exp\left[-\left(\frac{\lambda - \lambda_0}{\Delta\lambda}\right)^2 - \left(\frac{\varphi}{\Delta\varphi}\right)^2\right], \quad (7)$$

$$m = 0, 1, 2, \dots$$

e_{m0} 为第 m 阶衍射效率:

$$e_{m0} = \begin{cases} 1 - 4\eta(1 - \eta)\sin^2(\Phi/2), & m = 0 \\ \frac{4\sin^2(\eta m \pi)}{m^2 \pi^2} \sin^2(\Phi/2), & m \neq 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$\Phi = \frac{2\pi h(n-1)}{\lambda} \quad (\text{光栅的相对相移}), \quad (9)$$

由此,当取 $h = 269 \text{ nm}$ (光栅凹槽深度), $n = 1.46$ (掩模板材料折射率), $\eta = 0.5$ (光栅占空比), $\Lambda_{00} = 1054 \text{ nm}$ (均匀相位掩模板周期) $\lambda_0 = 248 \text{ nm}$ (紫外光源波长),光源谱宽为 1 nm ,发散角为 1 mrad 时可以计算相位掩模的近场光强在 z 方向和 x 方向的分布,

计算结果如图 2 所示。由图 2 可知,离掩模板的距离不同造成光强分布不同,而光强的大小正比于曝光能量的大小,从而引起折射率的调制是不同的。另外,紫外曝光引起的折射率调制与曝光能量为指数关系,但是在曝光未饱和区域即能量不足时,可以近似认为,折射率调制是和曝光能量成线性关系的,于是由光强的分布可以得到折射率调制的分布情况^[11, 12]。实际上,通过相位掩模的近场光强分布可以判断,离掩模板距离不同时,其主要影响的是折射率调制的幅度,而对折射率的“直流”调制量的影响

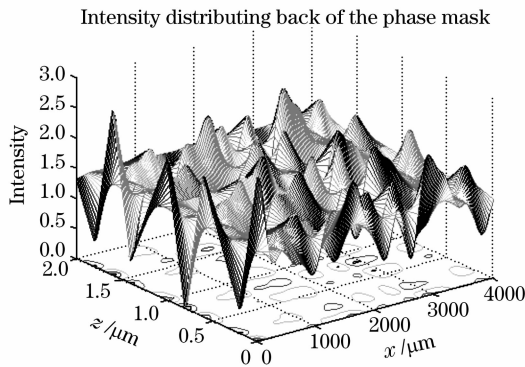


图 2 用有限时空相干性光源曝光时相位掩模的近场光强分布

Fig. 2 Near-field light intensity distribution for a light source with limited spatial and temporal coherence

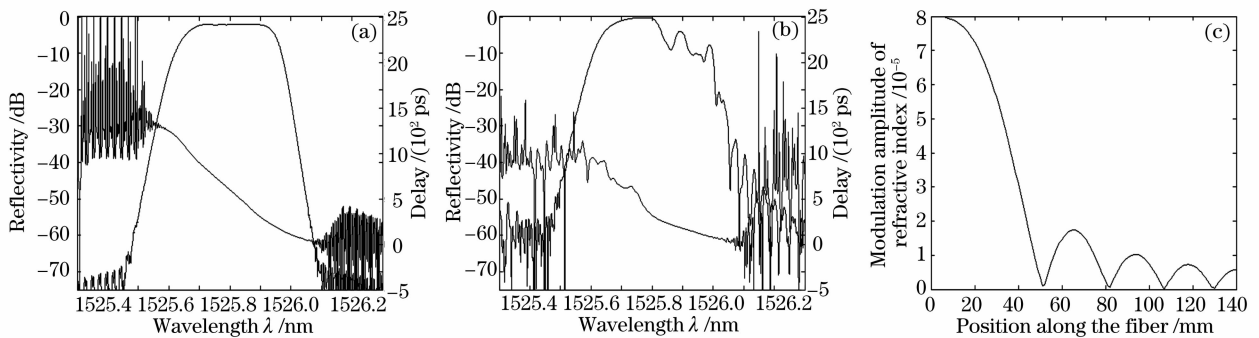


图 3 (a) 不考虑光纤弯曲时切趾啁啾光纤光栅的特性, (b) 考虑光纤弯曲时切趾啁啾光纤光栅的特性, (c) 光纤弯曲时折射率调制幅度 δn_1 沿光纤轴向变化情况

Fig. 3 (a) Characteristics of chirped fiber grating with apodization without considering the curve of fiber, (b) characteristics of chirped fiber grating with apodization considering the curve of fiber, (c) variations of modulation amplitude of refractive index δn_1 along the fiber

然后考虑由距离差异引起啁啾的因素,对啁啾光纤光栅进行分析。仿真参量同前,但由于距离的影响,把折射率调制深度加大到了 0.8×10^{-4} 。仿真结果如图 3(b) 所示,可以看到反射谱和时延都产生了严重的劣化,此时啁啾光纤光栅中心波长为 1525.740 nm, 3 dB 带宽为 0.170 nm, 而其线性部分的色散值为 (0.2 nm 带内) -1138 ps/nm, 时延纹

很小。在无耗的情况下,折射率的“直流”调制量可视为不变,而折射率调制的幅度振荡减小,越远离掩模板,其对比度就越低。

只考虑 z 方向,光强满足余弦分布,这和(1)式相对应,只考虑 x 方向,光强是渐减式振荡的。可以令利用分段均匀的思想,即光纤在一小段内与掩模板的距离是相等的,这样对于每一小段光纤有一个固定的光栅周期和纤芯折射率调制量。然后求解光纤光栅的耦合模方程^[7],可以得到光纤光栅的反射谱以及时延色散特性等。

2.3 写入光纤光栅的特性分析

首先在不考虑由距离差异引起的啁啾的情况下分析线性啁啾光纤光栅的特性。数值仿真参量选取如下:光纤参量为康宁 SMF-28 光纤氢载后的参量,掩模板的初始周期为 1054 nm,折射率调制深度为 0.4×10^{-4} ,光栅长度为 140 mm,啁啾系数 a 为 3.036×10^{-4} ;同时采用非对称高阶汉明(Hamming)函数切趾的方法改善光纤光栅的性能^[13]。计算得到此条件下啁啾光纤光栅的反射谱及时延特性如图 3(a) 所示,该啁啾光纤光栅的中心波长为:1525.806 nm, 1 dB 带宽为:0.249 nm, 3 dB 带宽为:0.295 nm, 0.2 nm 带宽下色散值为 -2974 ps/nm, 时延纹波为 5 ps。

波为 22 ps。可见折射率调制幅度的影响是相当大的,它不仅造成了反射谱的振荡、时延曲线的劣化,也使得色散值变小,时延纹波变大,这对于色散补偿来说是相当不利的因素。图 3(c) 给出了沿着光纤轴向折射率调制幅度 δn_1 的变化情况,它表现为随着与掩模板距离的加大而渐减振荡,在光栅长度为 50 mm 处其调制已经相当微弱了。在离掩模板最

远处, 光纤弯曲的程度最大, 光栅的周期最大, 在反射谱上反映在长波长端, 而此时由于离掩模板很远, 折射率调制幅度减到最小。也就是说, 从短波长端到长波长端, 折射率的调制是振荡减小的, 因而在同方向上(轴向)由折射率调制引起的啁啾与由光栅周期变化引起的啁啾是相反的, 因此色散值会变小。

另外, 由于光纤弯曲造成的倾斜也会对光栅的特性产生影响。此时前向基模与反向基模的耦合强度会减小, 在光纤光栅最远端, 即 140 mm 处夹角最大, 达到 0.998° , 这也会造成反射率的降低。总之, 光纤离掩模板的距离, 曝光光源的相干性, 以及光纤的弯曲程度都会影响光纤光栅的成栅效果。

3 实验过程及结果

首先要实现的是, 光纤必须严格按照弯曲函数弯曲, 利用一块纯石英长方体将其一面磨成符合弯曲函数的曲面, 即与此面相邻两面的曲线都严格符合弯曲函数。采用纯石英材料是因为紫外曝光时不会给掩模板带来杂质的干扰。然后在弯曲曲面中间位置的两端刻浅槽, 使得裸纤固定在该曲面上, 此时光纤的弯曲符合曲线函数。弯曲函数参量的取值同理论仿真时的取值。根据仿真给出的参量, 光纤离掩模板的距离最大为 2.3 mm, 由掩模板后的近场

光强分布可知, 此时仍可以发生 ± 1 阶衍射, 从而形成光纤光栅。

将固定在石英块上的弯曲光纤(氢载的康宁 SMF-28 光纤)放在均匀相位掩模板(周期为 1054 nm)后, 注意与石英块曲面对应的平面应该和掩模板平面平行, 而且在光纤开始弯曲的始端应该无限靠近掩模板; 用 Tuilaser 公司的 Braggstar 200 KrF 准分子激光器射出的 248 nm 紫外光进行曝光, 同时进行非对称高阶切趾。利用掺铒光纤放大器的放大自发辐射宽带光源, 用光谱仪测量该光纤光栅的反射谱, 测得光栅的中心波长为 1525.848 nm, 3 dB 带宽为 0.256 nm, 如图 4(a) 所示。用 CD400 色散分析仪测量其功率及时延曲线的结果如图 4(b), 测量步长为 0.002 nm, 计算其 0.2 nm 带宽内(线性部分)的色散值为 -1102 ps/nm, 纹波是 17 ps, 这基本与仿真结果一致。当改变光纤的弯曲程度时即可以改变光纤光栅的啁啾量, 从而实现用一块均匀相位掩模板写入不同啁啾量的啁啾光纤光栅, 大大降低了啁啾光栅写入的成本。这种方法的缺点是光纤的弯曲会使时延曲线劣化, 时延纹波变大。另外, 由于光纤的弯曲还引起了较大的包层模损耗, 关于这一点的分析, 将在以后的文章中说明, 该损耗可以通过外层涂覆高折射率涂层得到适当改善。

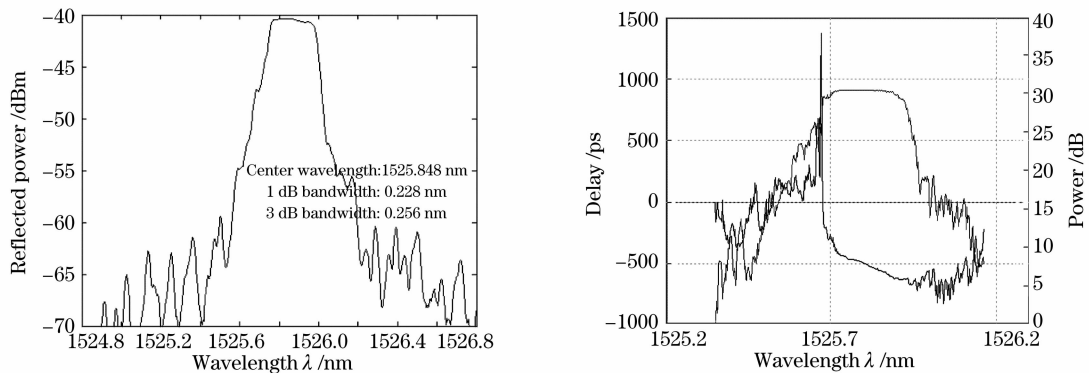


图 4 (a) 实际制作的啁啾光纤光栅的反射谱, (b) 实际制作的啁啾光纤光栅的功率谱和时延曲线

Fig. 4 (a) Reflection spectra, (b) power spectra and delay curve of the chirped fiber grating fabricated practically

4 结 论

提出了一种利用均匀相位掩模板写入啁啾光纤光栅的方法: 将光纤弯曲, 由于光纤离掩模板的距离不同从而使光栅的周期轴向渐变, 由此产生啁啾。实验设计了一种石英曲面, 使得光纤严格按照线性啁啾变化的弯曲函数进行弯曲。通过改变石英曲面, 即改变弯曲函数可以写入不同的色散量的啁啾光纤光栅, 达到利用一块均匀相位掩模板制作不同

色散量的啁啾光纤光栅的目的, 大大降低了啁啾光纤光栅的制作成本。这种方法不仅在理论上是可行的, 同时在实验上也得到了很好的印证。

参 考 文 献

- 1 Z. W. Tan, Y. Liu, Y. Chen *et al.*. 8×10 Gb/s transmission system over 1500 km on G. 652 fiber dispersion compensated by chirped fiber gratings[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(8): 441~443
- 2 Chen Yong, Cao Jihong, Chen Ting *et al.*. Optimal modulation

- formats for 2560 km optical transmission with low-power penalty [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(3): 331~335
 陈 勇,曹继红,陈 婷等. 优化调制格式实现 2560 km 低代价无误码传输[J]. *光学学报*, 2006, **26**(3): 331~335
- 3 Liu Feng, Ye Qing, Zhou Yinwi *et al.*. Influence of polarization mode dispersion and group time delay ripple on dispersion compensation by chirped fiber grating [J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, **32**(5): 668~672
 刘 峰,叶 青,周赢武等. 偏振模色散和时延抖动对啾啾光纤光栅色散补偿特性的影响[J]. *中国激光*, 2005, **32**(5): 668~672
- 4 Q. Zhang, D. A. Brown, L. J. Reinhart *et al.*. Linearly and nonlinearly chirped Bragg gratings fabricated on curved fibers[J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(10):1122~1124
- 5 Liu Yan. Study on fabrication and applications of fiber grating based devices[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2005. 85~86
 刘 艳. 光纤光栅器件的研制与应用[D]. 北京: 北京交通大学, 2005. 85~86
- 6 K. Sugden, I. Bennion, A. Molony *et al.*. Chirped gratings produced in photosensitive optical fibers by fibre deformation during exposure[J]. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(5): 440~442
- 7 T. Erdogan. Fiber grating spectra [J]. *Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1277~1294
- 8 Chen Genxiang. Photo-induced Bragg gratings in optical fibers [D]. Beijing: Northern Jiaoton University, 1997. 46~53
 陈根祥. 光致折射率调制光纤 Bragg 光栅的研究[D]. 北京: 北方交通大学, 1997. 46~53
- 9 Z. Xiong, G. D. Peng, B. Wu *et al.*. Effects of the zeroth-order diffraction of a phase mask on Bragg gratings [J]. *Lightwave Technol.*, 1999, **17**(11): 2361~2365
- 10 D. Park, M. Kim. Simple analysis of the energy density distribution of the diffracted ultraviolet beam from a fiber Bragg grating phase mask [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(16): 1849~1851
- 11 K. P. Chen, P. R. Herman. Photosensitization of standard fibers with deep UV laser radiation [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2003, **21**(9): 1958~1967
- 12 G. A. Miller, C. G. Askins, G. A. Cranch *et al.*. Early index growth in germanosilicate fiber upon exposure to continuous-wave ultraviolet light [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2007, **25**(4): 1034~1044
- 13 Liu Yan, Zheng Kai, Tan Zhongwei *et al.*. Good performance of chirped fiber Bragg gratings obtained by asymmetrically one-side exposure apodization [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(11): 5859~5865
 刘 艳,郑 凯,谭中伟等. 非对称单侧曝光切趾使啾啾光纤光栅获得优化性能[J]. *物理学报*, 2006, **55**(11): 5859~5865