

啁啾光纤光栅透镜法制作技术的理论与实验研究*

陈根祥 秦玉文 简水生

(北方交通大学光波技术研究所, 北京 100044)

摘 要 对利用零级抑制均匀相位掩模版结合球面透镜制作啁啾(Chirp)光纤光栅的技术进行了详细的理论和实验研究。结果表明这种方法适合于制作啁啾参数较小的光纤光栅, 当所制作的光栅啁啾参数较大时, 将导致严重的光谱不对称性和包层模耦合。

关键词 光纤光栅, 相位掩模, 啁啾光栅。

1 引 言

随着光纤光栅紫外写入技术的迅速发展, 利用啁啾光栅对常规光纤色散进行补偿的研究取得了显著的进展, 迄今为止已经有多种方法被用于产生啁啾光纤光栅。Hill 等人^[1]采用使光栅的光学周期($n_{eff} \Lambda$)沿光栅长度方向发生渐变的两次曝光法用等周期光强分布制作了啁啾光纤光栅。Sugden 等人^[2]以及 Zhang 等人^[3]通过在曝光过程中使光纤弯曲放置的方法在光纤上制作了啁啾光栅。Byron 等人^[4]、Dong 等人^[5]以及 Putnam 等人^[6]均采用氢氟酸腐蚀使光纤外径发生渐变然后在其上写入等周期光栅, 通过在写入过程中或写入完毕后在光纤上施加应力的方法制作了啁啾光纤光栅。此外, Hill 等人^[7]以及 Taverner 等人^[8]通过对均匀光栅施加应力或温度梯度的方法在均匀光栅中产生了啁啾效应。Farriers 等人^[9]通过在双光束全息光路系统中加入柱面镜使两束光的干涉角度沿光纤轴向发生连续变化在光纤上制作了啁啾光栅。Eggleton 等人^[10]则利用紫外光斑的高斯型强度分布用棱镜干涉法制作了啁啾光纤光栅, Cole, Loh 等人^[11]发展了具有高度灵活性的光纤移动/光束扫描相位掩模法光纤光栅制作技术, 并以这种方法用均匀相位掩模版制作了啁啾光纤光栅。Kashyap 等人^[12]采用由电子束曝光图形生成技术制作的分段啁啾零级抑制相位掩模版在光纤上制作了分段啁啾光栅。

本文首先对啁啾光纤光栅的透镜法制作技术进行了详细的理论分析, 然后以 248 nm 的 KrF 准分子激光器为光源采用零级抑制均匀周期相位掩模版和球面透镜在 B/Ge 双掺光纤上实际制作了带宽为 4 nm 的啁啾光纤光栅并对得到的实验结果进行了分析和讨论。

2 理论分析

利用均匀相位掩模版产生啁啾光纤光栅的透镜法制作技术的基本原理和实验设置如图 1

* 国家自然科学基金(批准号 69777010)和国家科委 863 高科技资助项目。

收稿日期: 1997-03-05; 收到修改稿日期: 1997-06-10

所示。对于以角度 $\varphi(x)$ 入射的光场, 其 +1 和 -1 级衍射光的衍射角为:

$$\begin{aligned} \Psi_{+1}(x) &= \sin^{-1}[\lambda/\Lambda + \sin \varphi(x)] \\ \Psi_{-1}(x) &= \sin^{-1}[\lambda/\Lambda - \sin \varphi(x)] \end{aligned} \quad (1)$$

式中 λ 为紫外光波长, Λ 为掩模版周期。如果忽略除 ±1 级以外其它衍射级之间的干涉作用, 则由 ±1 级衍射在光纤中所产生的光栅周期为:

$$P(x) = \frac{\Lambda}{2 \cos \theta} \left[1 + \frac{\Lambda}{\lambda} \sin \left[\frac{\Psi_{+1} + \Psi_{-1}}{2} \right] \times \sin \left[\frac{\Psi_{+1} - \Psi_{-1}}{2} \right] \tan \theta \right]^{-1} \quad (2)$$

当 $|\varphi| \ll 1$, $\theta \ll 1$ 时, (2) 式可以简化为:

$$P(x) = \frac{\Lambda}{2} \left[1 - \varphi(x) \theta \left[1 - \frac{\lambda^2}{\Lambda^2} \right]^{-1/2} \right] = P_0 \left[1 - x \left[\frac{\theta}{f-d} \right] \left[1 - \frac{\lambda^2}{\Lambda^2} \right]^{-1/2} \right] \quad (3)$$

式中 f 为透镜焦距, d 为透镜到掩模版的距离, $P_0 = \Lambda/2$ 为光栅中点处的周期。根据 (3) 式, 光栅的啁啾参数为:

$$C = \frac{L}{2} \left[\frac{\theta}{f-d} \right] \left[1 - \frac{\lambda^2}{\Lambda^2} \right]^{-1/2} \quad (4)$$

式中 L 为光栅长度。

上述分析是针对会聚透镜进行的, 对于发散透镜可以通过完全相同的分析得到与 (3) 式相似的结果:

$$P(x) = P_0 \left[1 + x \left[\frac{\theta}{f+d} \right] \left[1 - \frac{\lambda^2}{\Lambda^2} \right]^{-1/2} \right] \quad (5)$$

光栅的啁啾参数为:

$$C = \frac{L}{2} \left[\frac{\theta}{f+d} \right] \left[1 - \frac{\lambda^2}{\Lambda^2} \right]^{-1/2} \quad (6)$$

根据上述结果, 在用透镜法制作啁啾光纤光栅时, 光栅的啁啾参数可以通过改变 θ 、 f 或 d 加以调节。

3 实验结果及讨论

图 2 为采用零级抑制均匀相位掩模版和球面会聚透镜制作啁啾光纤光栅的实验设置示意图。光源为 LPX-150 型 KrF 准分子激光器。实验中所用的平凸球面透镜焦距为 $f = 75 \text{ mm}$, 透镜距掩模版 $d = 25 \text{ mm}$, 光栅长度 $L = 15 \text{ mm}$, 光纤与掩模版之间的夹角约为 $\theta = 0.023 \text{ rad}$, 相位掩模版周期 $\Lambda = 1078 \text{ nm}$ 。

图 3 为使用上述曝光机构在 B/Ge 光敏光纤上实际制作的一啁啾光栅反射谱, 光栅反射谱宽度约 4 nm。在曝光过程中, KrF 准分子激光单脉冲能量密度设定为约 800 mJ/cm^2 , 脉冲重复频率 5 Hz, 曝光时间 41 min。根据上述实验参数和 (5) 式可以计算出光栅的啁啾参数为 $C = 3.4 \times 10^{-3}$ 。

在上述啁啾光纤光栅反射谱长波长端的高反射峰主要是由下述两方面的原因造成的: 根据相位掩模图形生成的理论, 对于时间和空间相干性有限的入射激光, 掩模版后面的光强图

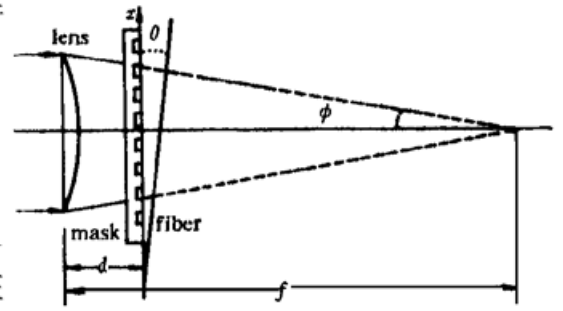


Fig. 1 Principle for producing chirped fiber gratings using lenses and uniform masks

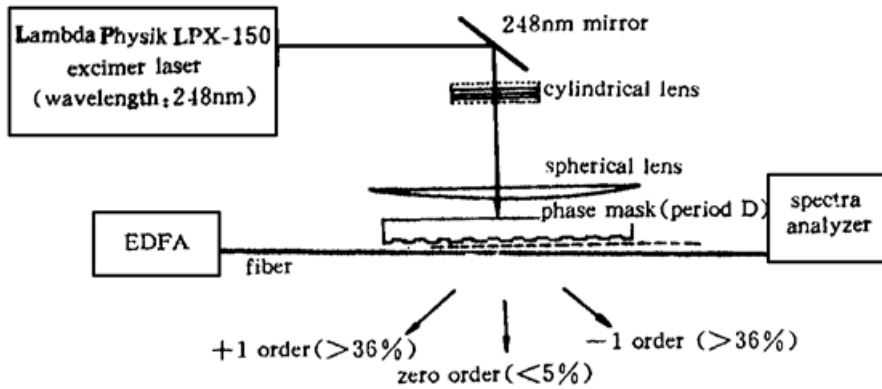


Fig. 2 Experimental setup for producing chirped fiber gratings using lenses and uniform masks

案对比度将随着光纤到掩模版表面距离的增加而减弱。因此上述实验设置将导致光栅的长周期端比短周期端的折射率调制强度大很多。另一方面的原因是由于光栅的中心位置与图 1 所示球面透镜系统的光轴不重合造成的。图 4 为这种情况下根据耦合模方程计算的一啁啾光纤光栅反射谱。计算中所选用的参数为： $C = 3.4 \times 10^{-3}$ ，光栅范围 $-2.5 \text{ mm} < x < 12.5 \text{ mm}$ ，并假定光栅的折射率调制强度沿光栅长度方向是按指数式衰减的。这一计算结果与上述啁啾光栅反射谱具有完全相同的特征。

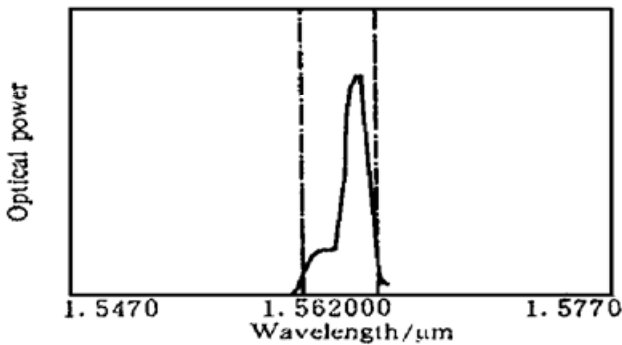


Fig. 3 Reflection spectra of a chirped fiber grating fabricated using lens and uniform mask

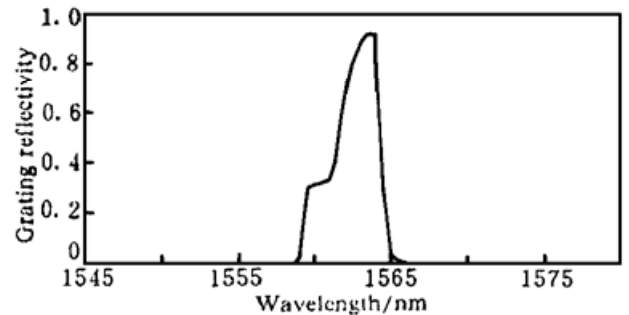


Fig. 4 Theoretical result of a chirped grating reflection spectra with index modulation varied along the fiber

用这种方法制作啁啾参数较大的光纤光栅除了具有上述严重的光谱不对称性之外还有另外一个不足之处，即光栅具有较大的短波长损耗，这是由于这种制作方法引入了光栅条纹与光纤轴线的非正交性所致。

通过改变透镜焦距 f 、角度 θ 以及 d 等实验参数，采用图 2 的实验设置可以制作出一系列具有不同啁啾参数的光纤光栅。用光谱仪对其反射谱所进行的测量表明，当光栅的啁啾参数 C 小于约 7×10^{-4} 时，由于折射率调制强度渐变所引起的光栅反射谱不对称性基本上得到消除，同时光栅的短波长损耗也可得到很大的抑制。由于测试系统分辨率的限制。文中没有给出这种情况下啁啾光栅反射谱的细节。

结 论 从理论分析和实验研究结果可以发现，利用球面透镜和均匀相位掩模版适合于制作啁啾参数较小的啁啾光纤光栅。用这种方法制作啁啾参数较大的光纤光栅将导致严重的光谱不对称性和较大的短波长损耗。当光栅的啁啾参数小于约 7×10^{-4} 时，由于折射率调制强度渐变所引起的光栅反射谱不对称性基本上得到消除，同时光栅的短波长损耗也可得到很大的抑制。

参 考 文 献

- [1] K. O. Hill, F. Bilodeau, B. Malo *et al.*, Chirped in-fiber Bragg gratings for compensation of optical-fiber dispersion. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(12) : 1314~ 1316
- [2] K. Sugden, I. Bennion, A. Molony *et al.*, Chirped gratings produced in photosensitive optical fibers by fiber deformation during exposure. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(5) : 440~ 442
- [3] Q. Zhang, D. A. Brown, L. J. Reinhart *et al.*, Linearly and nonlinearly chirped Bragg gratings fabricated on curved fibers. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(10) : 1122~ 1124
- [4] K. C. Byron, H. N. Rourke, Fabrication of chirped fiber gratings by novel stretch and write technique. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(1) : 60~ 61
- [5] L. Dong, J. L. Cruz, L. Reekie *et al.*, Fabrication of chirped fiber gratings using etched tapers. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(11) : 908~ 909
- [6] M. A. Putnam, G. M. Williams, E. J. Friebele, Fabrication of tapered, strain-gradient chirped fiber Bragg gratings. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(4) : 309~ 310
- [7] P. C. Hill, B. J. Eggleton, Strain gradient chirp of fiber Bragg gratings. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(14) : 1172~ 1174
- [8] D. Taverner, D. J. Richardson, S. Barcelos *et al.*, Dispersion compensation of 16 ps pulses over 100 km of step-index fiber using cascaded chirped fiber gratings. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(12) : 1004~ 1006
- [9] M. C. Farries, C. M. Ragdale, D. C. J. Reid, Broadband chirped fiber Bragg filters for pump rejection and recycling in erbium doped fiber amplifiers. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(5) : 487~ 489
- [10] B. J. Eggleton, P. A. Krug, L. Poladian *et al.*, Experimental demonstration of compression of dispersed optical pulses by reflection from self-chirped optical fiber Bragg gratings. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(12) : 877~ 879
- [11] M. J. Cole, W. H. Loh, R. I. Laming *et al.*, Moving fiber/phase maskscanning beam technique for enhanced flexibility in producing fiber gratings with uniform phase mask. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(17) : 1488~ 1489
- [12] R. Kashyap, P. F. McKee, R. J. Campbell *et al.*, Novel method of producing all fiber photoinduced chirped gratings. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(12) : 996~ 998

Theoretical and Experimental Study on Fabrication of Chirped Fiber Gratings Using Lenses and Uniform Masks

Chen Genxiang Qin Yuwen Jian Shuisheng

(*Institute of Lightwave Technology, Northern Jiaotong University, Beijing 100044*)

(Received 5 March 1997; revised 10 June 1997)

Abstract Fabrications of chirped fiber gratings using spherical lenses and zero-order nulled phase masks are studied theoretically and experimentally in details. The results show that this method is suitable for producing fiber gratings with small chirp parameters, and will lead to severe unsymmetrical reflection spectra and cladding mode coupling when the chirp parameters of the gratings are relatively large.

Key words fiber grating, phase mask, chirped grating.