

文章编号: 0258-7025(2009)03-0677-06

# 线性啁啾相位掩模的研制

刘全<sup>1</sup> 吴建宏<sup>1</sup> 杨卫鹏<sup>1</sup> 方玲玲<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 苏州大学信息光学工程研究所, 江苏 苏州 215006; <sup>2</sup> 臻飞光学(苏州)有限公司研发处, 江苏 苏州 215000)

**摘要** 利用严格耦合波理论分析了线性啁啾相位掩模的衍射特性, 得到只有当相位掩模的占宽比在 0.37~0.50 之间, 槽形深度在 242~270 nm 之间时, 才能保证零级衍射效率小于 2%, 同时正负一级的衍射效率大于 35%。在此基础上, 利用全息-离子束刻蚀和反应离子束刻蚀相结合的新方法, 制作了中心周期为 1000 nm, 啁啾率 1 nm/mm, 有效面积为 100 mm×10 mm 的线性啁啾相位掩模。发现先用短时间 Ar 离子束刻蚀对光刻胶光栅掩模槽形进行修正, 然后采用 CHF<sub>3</sub> 反应离子束刻蚀, 能得到更合适的占宽比, 从而确定了刻蚀新工艺。实验测量表明其零级衍射效率小于 2%, 正负一级衍射效率大于 35%, 最大非线性系数为 1.6%。理论分析表明该相位掩模能够满足制作线性啁啾光纤光栅的需要。

**关键词** 衍射与光栅; 线性啁啾相位掩模; 严格耦合波理论; 离子束刻蚀; 衍射效率

**中图分类号** TN253; TN305.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093603.0677

## Fabrication of Linearly Chirped Phase Mask

Liu Quan<sup>1</sup> Wu Jianhong<sup>1</sup> Yang Weipeng<sup>1</sup> Fang Lingling<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Information Optical Engineering, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China  
<sup>2</sup> Research and Development Department, Core-Flex Optical (Suzhou) Limited Company,  
Suzhou, Jiangsu 215000, China

**Abstract** The diffraction characteristics of the linearly chirped phase mask is investigated using rigorous coupled-wave theory. The results show that the groove depth and duty cycle of phase mask must be controlled within the range of 242~270 nm and 0.37~0.50 respectively, in order to make the zero order diffraction efficiency less than 2% and the  $\pm 1$  order diffraction efficiency more than 35%. Based on the above analysis, a linearly chirped phase mask with the center period of 1000 nm, ruled area of 100 mm×10 mm and chirp rate of 1 nm/mm has been fabricated by a new technique, which combines holographic-ion beam etching and reactive ion beam etching. The experiment and simulation both indicate that the Ar ion beam etching can modify the initial photoresist grating profile and produce a suitable duty cycle under the CHF<sub>3</sub> reactive ion beam etching. Experimental measurements show that the zero order diffraction efficiency is less than 2%, with the  $\pm 1$  order diffraction efficiency more than 35% and the maximum nonlinear coefficient of 1.6%. Theoretical analysis also indicates that the phase masks can be used to fabricate the UV written chirped fiber Bragg gratings.

**Key words** diffraction and gratings; linearly chirped phase mask; rigorous coupled-wave theory; ion beam etching; diffraction efficiency

## 1 引言

光纤光栅技术是当前光纤通信、光纤传感、光信息处理领域的一个全球性热门课题, 是继 20 世纪 70 年代低损耗光纤, 80 年代掺铒光纤放大器

(EDFA)之后光纤领域中具有里程碑意义的第 3 次重大技术突破。近年来, 光纤光栅在光纤通信和传感技术领域得到了越来越广泛的应用。在光纤通信方面, 光纤光栅的影响几乎遍及系统的各个部分,

**收稿日期**: 2008-10-15; **收到修改稿日期**: 2008-12-26

**基金项目**: 江苏省高技术研究计划(BG2004020)资助项目。

**作者简介**: 刘全(1978-), 男, 助理研究员, 博士研究生, 主要从事衍射光学和微细加工方面的研究。

E-mail: liuquan@suda.edu.cn

**导师简介**: 吴建宏(1960-), 男, 研究员, 博士生导师, 研究方向为衍射光学和光信息处理。E-mail: jhwu@suda.edu.cn

包括光发送、光放大、光纤色散补偿和光接收等。在传感器方面,光纤光栅也有着广阔的应用前景,它能够方便地实现物理量的分布式传感,可应用于建筑结构监控、化学传感和航空航天等各个方面<sup>[1~4]</sup>。

啁啾光纤光栅在光通信等领域尤其是补偿光纤色散中有重要应用<sup>[5,6]</sup>,人们对其制备进行了大量的研究,提出了许多办法。其中相位掩模法不依赖于入射光波长,只与相位掩模的周期有关,适合批量生产,同时又较容易实现。故相位掩模法是当前一种非常实用的光纤光栅制作方法,并被广泛采用<sup>[7,8]</sup>。线性啁啾相位掩模是相位掩模法的主要光学器件,其研制是啁啾光纤光栅制作的关键技术。

国内北方交通大学陈根祥等<sup>[9]</sup>采用光刻胶、铬的双层掩蔽法,以  $\text{CHF}_3/\text{O}_2$  为反应气体,用反应离子刻蚀技术制作了非啁啾相位掩模,其零级衍射效率在 5.97%,一级衍射效率在 25% 左右,已能初步满足制作光纤光栅的需要。对于啁啾相位掩模,一般是采用电子束直写制作掩模,再通过反应离子刻蚀将掩模图形转移到熔石英基片上<sup>[10]</sup>。本文报道了通过制作全息啁啾光栅掩模,采用离子束刻蚀和反应离子束刻蚀相结合的新方法在熔石英基片上制作线性啁啾相位掩模的实验及其结果,其零级衍射效率被抑制在 2% 以下,一级衍射效率在 35% 左右,最大非线性系数为 1.6%。

## 2 线性啁啾相位掩模的衍射特性

相位掩模法的基本原理是:在制作光纤光栅时,一束紫外相干光垂直入射到相位掩模的表面,在紧贴相位掩模处,放入光纤,主要根据士 1 级衍射光的干涉,在光纤内形成光纤光栅,如图 1 所示。实际使用时,必须对零级衍射光进行抑制,通常要求其衍射效率小于 2%。

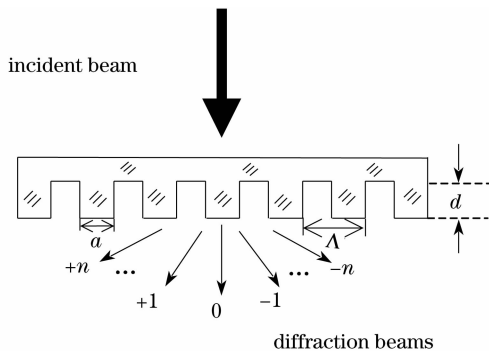


图 1 相位掩模结构

Fig. 1 Structure of phase mask

根据需要制作的线性啁啾光纤光栅相位掩模的参数为:中心周期为  $\Lambda = 1000 \text{ nm}$ ,啁啾系数为  $F = 1 \text{ nm/mm}$ ,有效长度为  $L = 100 \text{ mm}$ 。

### 2.1 零级衍射效率与槽形深度及占宽比的关系

使用严格耦合波理论的 matlab 程序<sup>[11]</sup>来分析相位掩模的零级衍射效率与槽形深度和及宽比之间的关系。假定相位掩模是矩形的表面浮雕型光栅结构(如图 1),入射光是 248 nm 的紫外光,熔石英基底的折射率为 1.51,垂直入射,TE 偏振。模拟了中心周期处不同深度  $d$  和不同占宽比( $f = a/\Lambda$ )情况下的零级衍射效率,如图 2 所示。其相应的正负一级衍射效率与相位掩模的槽深  $d$  和占宽比的关系如图 3 所示。

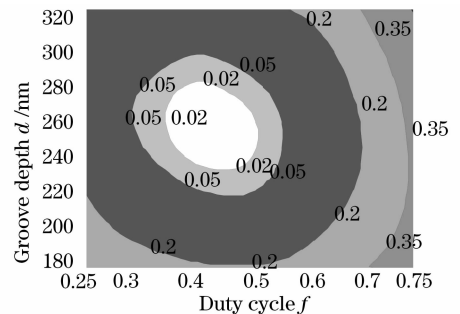


图 2 相位掩模的槽深和占宽比与零级衍射效率的关系  
Fig. 2 Relationship among groove depth, duty cycle and diffraction efficiency of zero-order

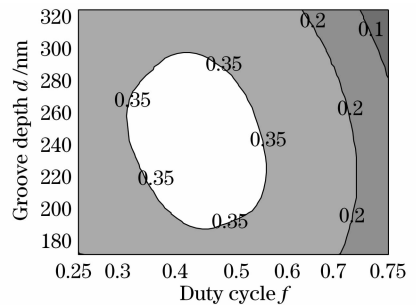


图 3 相位掩模的槽深和占宽比与 1 级衍射效率的关系  
Fig. 3 Relationship among groove depth, duty cycle and diffraction efficiency of 1-order

从图可以得到,只有当占宽比在 0.37~0.50 之间,槽形深度在 242~270 nm 之间时,才能保证零级衍射效率小于 2%,同时正负一级的衍射效率大于 35%。

### 2.2 线性啁啾的周期对衍射效率的影响

取槽深为 250 nm,计算占宽比分别在 0.3,0.4,0.5,0.6 情况下零级和士 1 级衍射光的衍射效率与周期变化之间的关系如图 4 所示。

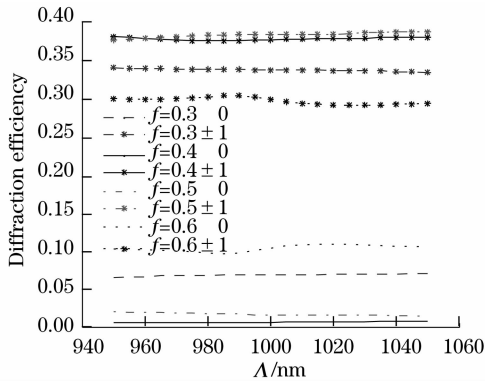


图 4 槽深  $d=250$  nm 时不同占宽比条件下衍射效率与光栅周期变化之间的关系

Fig. 4 Relationship between diffraction efficiency and periods of gratings with groove depth of 250 nm

从图 4 可以看出,当槽深为 250 nm 时,不同占宽比对应的衍射效率对光栅周期变化的敏感程度不同。当  $f=0.4, 0.5$  时,对应的零级和  $\pm 1$  级衍射光的衍射效率都满足要求,且衍射效率随光栅周期的变化改变很小;当  $f=0.3, 0.6$  时,可以看出对应的零级和  $\pm 1$  级衍射光的衍射效率都不能满足光纤光栅掩模的要求。由此分析可知,在光栅的槽深和占宽比同时使光栅的衍射效率满足光纤光栅相位掩模的要求这个前提下,光栅周期的改变对其衍射效率影响并不大。

### 3 线性啁啾相位掩模的制作

相位掩模是利用微细加工技术,通过全息光刻、显影、离子束刻蚀等多步工艺在石英基板上加工而成的表面浮雕型结构。基片是有效面积  $100 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  的熔石英,光刻胶为瑞红 RZJ-390 正胶。首先用 413 nm 的氩离子激光进行全息光刻,在光刻胶上形成中心周期为 1000 nm,啁啾系数为 1 nm/mm 的光刻胶光栅。在光刻胶的掩蔽下对熔石英基片进行离子束刻蚀和反应离子束刻蚀(均在国产 LKJ-150 型离子束刻蚀机上进行),将光栅图形转移到熔石英基片上。

#### 3.1 全息光刻

根据先前的线性啁啾光栅的设计<sup>[12]</sup>,采用两束发散球面波来记录线性啁啾相位掩模,使得基片中心的周期等于 1000 nm,且基片两端的周期差等于总的啁啾量(即 100 nm)。由此得到记录参数为  $C$  点极坐标( $1450 \text{ mm}, -30^\circ$ ),  $D$  点极坐标( $1595.5 \text{ mm}, -65.97^\circ$ ),其原理图如图 5 所示。

由上述记录参数进行全息光刻,得到光刻胶啁

啾光栅。其扫描电镜(SEM)照片如图 6 所示,其占宽比为 0.5。目前由全息光刻工艺得到的光刻胶啁啾光栅的占宽比基本上在 0.5 附近。

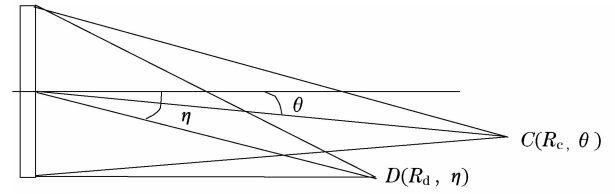


图 5 线性啁啾相位掩模全息记录的原理图

Fig. 5 Schematic of recording holographic phase mask

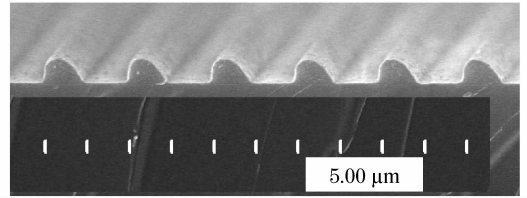


图 6 光刻胶啁啾光栅的电镜照片

Fig. 6 SEM photograph of the photoresist grating

#### 3.2 相位掩模的刻蚀制作

根据第 2 节的结论,相位掩模的刻槽深度必须控制在  $242 \sim 270 \text{ nm}$ ,占宽比必须控制在  $0.37 \sim 0.50$  的范围内,且从图 2,3 中可以看出,在占宽比为 0.43 附近时,深度具有最大的容许范围。同时根据 3.1 中的分析,目前得到的光刻胶光栅掩模的占宽比在 0.5 附近。为此发展了一种简便、有效的占宽比控制技术,即离子束刻蚀结合反应离子束刻蚀的新方法。

根据光刻胶、熔石英的离子束刻蚀特性<sup>[13]</sup>,运用高级线段运动算法<sup>[14-16]</sup>编写相应程序模拟了刻蚀过程中的槽形演化。针对线性啁啾相位掩模的要求,模拟了 5 min  $\text{CHF}_3$  反应离子束刻蚀的演化,发现刻蚀后的占宽比在 0.44 附近;采用 1 min Ar 离子束刻蚀再进行 5 min  $\text{CHF}_3$  反应离子束刻蚀,刻蚀后的相位掩模的占宽比在 0.38 附近,见图 7(初始掩模图形由实验制作的光刻胶光栅的 SEM 图得到;其中虚线条表示 Ar 离子束刻蚀,实线条表示  $\text{CHF}_3$  反应离子束刻蚀)。对此进行了实验验证,对相同的光刻胶光栅掩模分别进行了 5 min  $\text{CHF}_3$  反应离子束刻蚀;1 min Ar 离子束刻蚀后再进行 5 min  $\text{CHF}_3$  反应离子束刻蚀。Ar 离子束刻蚀条件为离子束流(100 mA)、加速电压(260 V)、入射角度( $0^\circ$ )和工作压强( $2.0 \times 10^{-2} \text{ Pa}$ ),离子能量(500 eV)。 $\text{CHF}_3$  反应离子束刻蚀条件为离子束流(100 mA)、加速电压(260 V)、入射角度( $0^\circ$ )和工作压强( $1.5 \times 10^{-2} \text{ Pa}$ ),离子能量(400 eV)。实验结果见图 8,光刻胶光栅掩模见图 6。

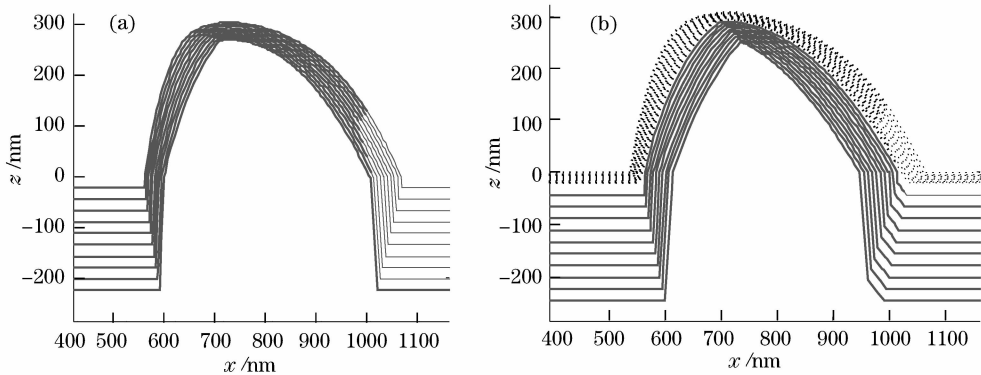


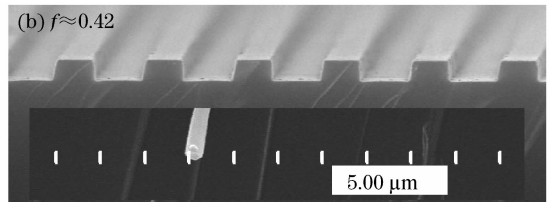
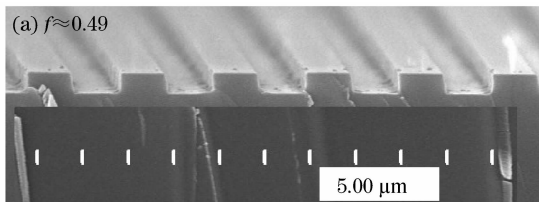
图 7 相位掩模的刻蚀演化图。(a)  $\text{CHF}_3$  反应离子束刻蚀；(b) Ar 离子束加  $\text{CHF}_3$  反应离子束刻蚀

Fig. 7 Profile evolution of phase mask. (a) profile evolution of reactive ion beam etching;

(b) profile evolution of Ar ion beam etching and reactive ion beam etching

理论模拟与实验结果的趋势一致,即短时间 Ar 离子束刻蚀能对光刻胶光栅掩模形貌进行修正,之后采用  $\text{CHF}_3$  反应离子束刻蚀能够得到较小的占宽比。理论模拟结果与实验结果不同的原因在于,所

采用的理论模型是理想的,没有考虑刻蚀过程中可能会存在的刻面效应,二次刻蚀效应以及再沉积效应等,只考虑了刻蚀速率和刻蚀选择比对刻蚀过程的影响。



8 相位掩模的电镜照片。(a)  $\text{CHF}_3$  反应离子束刻蚀 5 min；(b) 1 min Ar 离子束刻蚀加 5 min  $\text{CHF}_3$  反应离子束刻蚀

Fig. 8 SEM photograph of the phase mask. (a) 5 min reactive ion beam etching,

(b) 1 min ion beam etching followed by 5 min reactive ion beam etching

在以上分析的基础上,采用离子束刻蚀结合反应离子束刻蚀的新方法,制作了线性啁啾相位掩模。其 SEM 图如图 8(b) 所示。占宽比约为 0.42,槽深约为 265 nm,按照严格耦合波理论,可以得出零级衍射效率为 0.99%,正负一级衍射效率为 37.7%。

种不均匀导致了光刻胶掩模的占宽比存在某种不对称性,同时由于是非对称光路记录,所得到的光刻胶掩模就是非对称结构,且这种非对称结构也转移到基片中;2) 在离子束刻蚀过程中,在光栅槽底形成的微小起伏对激光的衍射作用;3) 在正负一级衍射效率的测量过程中,入射光与掩模之间的微小非正交性也可能造成正负一级衍射效率之间的不对称。

## 4 测试结果及其讨论

### 4.1 衍射效率

衍射效率的测量是在北京邮电大学光通信与光波技术研究中心进行的,图 9 为对线性啁啾相位掩模的各级衍射效率进行测量的实验装置简图,利用该中心的 248 nm 准分子激光器,对相位掩模的衍射效率进行了测量,沿相位掩模长度方向将其平均分成 3 个部分,每个部分随机取 5 点进行多次测量,得到的每个部分的平均衍射效率见表 1。

从测量结果看,相位掩模的  $\pm 1$  级衍射效率之间存在一点差异,这可能是由三方面的原因造成的:1) 在全息曝光过程中,所用的激光束在经过一系列光学元件后的光斑存在一定的不均匀性,这

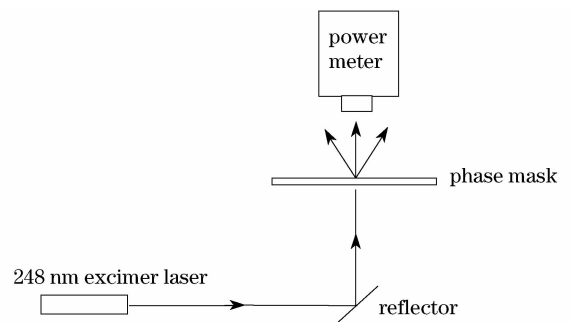


图 9 衍射效率的实验测量示意图

Fig. 9 Experimental setup for measuring the diffraction efficiency

表 1 衍射效率测量结果

Table 1 Results of the diffraction efficiency measurement

	1	2	3	Mean value
+1 order / %	35.4	36.3	34.8	35.5
0 order / %	2.0	1.6	1.9	1.8
-1 order / %	37.1	37.1	36.6	36.9

零级衍射效率在 1.8% 附近, 与理论结果也存在着差异, 这可能是由二方面的原因造成的: 1) 理论上的计算模型是简化的, 只考虑了矩形槽形情况; 2) 由于测量中一些微弱杂散光的影响, 造成测量的结果有一定的偏离。

一般地, 国外商用光纤光栅相位掩模的衍射效率指标是: 零级衍射光被抑制在 2% 以内;  $\pm 1$  级衍射光的效率大于 35%。对比此指标, 可见该线性啁啾相位掩模的衍射性能已经达到了它们的水平。

#### 4.2 啁啾率

用波长为 632.8 nm 的氦-氖激光器测量啁啾相位掩模各空间点位置的周期, 具体测量方法是: 激光不经扩束直接入射到相位掩模, 相位掩模逐点移动, 保持激光正入射, 每隔 5 mm 测量一次  $\pm 1$  级衍射角, 根据光栅方程  $\Lambda = \lambda / \sin \theta$  计算出对应点的周期  $\Lambda$ 。经过多次实验测量平均, 拟合出的实验数据如图 10 所示, 图中还给出了理想直线作为对比。

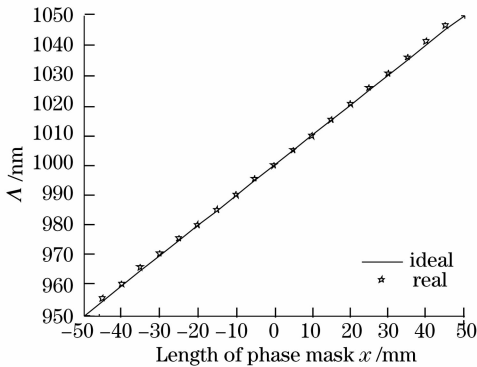


图 10 相位掩模的实际周期与理想周期的对比

Fig. 10 Contrast between real periods and ideal periods

以  $\Delta\Lambda(y) = |\Lambda_{\text{real}}(y) - \Lambda_{\text{ideal}}(y)|$  来表示线性啁啾的非线性偏离, 这里理想的线性啁啾的周期是  $\Lambda_{\text{ideal}}(y) = \Lambda_0 + Fy$ , 式中  $F$  是一常数, 称为啁啾系数,  $\Lambda_0$  是中心处的周期。  $y \in [-R, R]$ ,  $R = L/2$ ,  $L$  是基片的有效长度。

引入非线性系数  $h = \Delta\Lambda(y)_{\text{max}} / (F \times L)$  来具体表示线性啁啾的非线性偏离程度。由此得到所制作的线性啁啾相位掩模的最大非线性系数为 1.6%。加拿大 StockerYale 公司的产品指标中对于啁啾系数在 0.003 ~ 3 nm/mm 范围内的非线性系数为

0.5% ~ 35%。可见该相位掩模已达到了商用产品的指标。

## 5 结 论

详细分析了线性啁啾相位掩模的衍射特性, 得到只有当占宽比在 0.37 ~ 0.50 之间, 槽形深度在 242 ~ 270 nm 之间时, 才能保证零级衍射效率小于 2%, 同时  $\pm 1$  级的衍射效率大于 35%; 采用全息-离子束刻蚀和反应离子束刻蚀相结合的新方法, 制作了中心周期为 1000 nm, 啁啾率 1 nm/mm, 有效面积为 100 mm  $\times$  10 mm, 占宽比为 0.42, 槽深为 265 nm 的线性啁啾相位掩模。实验测量表明其零级衍射效率被抑制在 2.0% 以内, 正负一级衍射效率大于 35%, 最大非线性系数为 1.6%。理论分析表明该相位掩模能够满足制作啁啾光纤光栅的需要。制作的线性啁啾相位掩模的指标已经达到了国外相位掩模厂家的水平。

致谢 衷心感谢北京邮电大学余重秀、孟照方等同志在衍射效率测量中提供的大量帮助。

## 参 考 文 献

- 1 K. O. Hill, Y. Fujii, D. C. Jonson *et al.*. Photosensitivity in optical fiber waveguides: application to reflection fiber fabrication [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1978, **32**(10): 647~649
- 2 Wu Lin, Pan Wenna, Yin Zongmin *et al.*. Application research of fiber gratings[J]. *Optical Fiber & Electric Cable*, 2005, (1): 6~10  
武 林, 潘文娜, 殷宗敏 等. 光纤光栅的应用研究[J]. *光纤与电缆及其应用技术*, 2005, (1): 6~10
- 3 Yang Sha, Geng Jianxin, Ye Qing *et al.*. Application of fiber Bragg gratings in monitoring metal corrosion [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(5): 641~644  
阳 莎, 耿健新, 叶 青 等. 光纤光栅在金属锈蚀传感中的应用[J]. *中国激光*, 2006, **33**(5): 641~644
- 4 Guo Tuan, Liu Bo, Zhang Weigang *et al.*. Research on optical fiber grating chirp-sensing technology[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 828~834  
郭 团, 刘 波, 张伟刚 等. 光纤光栅啁啾化传感研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(5): 828~834
- 5 Liu Songhao, Du Weichong, Tan Huayao *et al.*. Dispersion compensation by chirped optical fiber grating in optical fiber communication system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(1): 24~28  
刘颂豪, 杜卫冲, 谭华耀 等. 啁啾光纤光栅在光纤通信系统中的色散补偿[J]. *光学学报*, 2000, **20**(1): 24~28
- 6 Lü Bo, Gong Taorong, Xu Ou *et al.*. Performance optimization of linear chirped gratings using genetic algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(8): 1434~1440  
吕 博, 龚桃荣, 许 鸥 等. 利用遗传算法优化线性啁啾光栅性能[J]. *光学学报*, 2008, **28**(8): 1434~1440
- 7 K. O. Hill, B. Malo, F. Bilodeau *et al.*. Bragg gratings fabricated in monomode photosensitivity optical fiber by UV exposure through a phase mask[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, **62**(10): 1035~1037

8 Jia Hongzhi, Li Yulin, Hu Manli. Fabrication methods of fiber gratings[J]. *Laser Technology*, 2001, **25**(1): 23~26  
贾宏志,李育林,忽满利. 光纤光栅的制作方法[J]. 激光技术, 2001, **25**(1): 23~26

9 Chen Gengxiang, Cheng Meiqiao, Ge Huang *et al.*. Fabrication of zero-order nulled silica phase masks for 248 nm KrF excimer laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 1997, **A24**(7): 623~626  
陈根祥,程美乔,葛 璜 等. 248 nm KrF 准分子激光零级抑制石英相位掩模器的研制[J]. 中国激光, 1997, **A24**(7): 623~626

10 A. Swanton, D. J. Armes, K. J. Young-Smith *et al.*. Use of e-beam written, reactive ion etched, phase masks for the generation of novel photorefractive fiber gratings [J]. *Microelectronic Engineering*, 1996, **30**: 509~512

11 Liu Quan, Wu Jianhong. Analysis and comparison of the scalar diffraction theory and coupled-wave theory about grating[J]. *Laser Journals*, 2004, **25**(2): 31~34  
刘 全,吴建宏. 光栅的标量衍射理论与耦合波理论的分析比较[J]. 激光杂志, 2004, **25**(2): 31~34

12 Fang lingling, Wu Jianhong, Liu Quan *et al.*. Design of linearly chirped phase mask[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, **33**(11): 88~92  
方玲玲,吴建宏,刘 全 等. 线性啁啾相位掩模的设计[J]. 光电工程, 2006, **33**(11): 88~92

13 Fang Lingling. The design and fabrication of phase mask[D]. Suzhou: Soochow University, 2006, 21~40  
方玲玲. 光纤光栅相位掩模的设计及制作[D]. 苏州:苏州大学, 2006, 21~40

14 R. Smith, M. A. Tagg. An algorithm to calculate secondary sputtering by the reflection of ions in two dimensions [J]. *Vacuum*, 1986, **36**(5): 285~288

15 N. Yamauchi, T. Yachi, T. Wada. A pattern edge profile simulation for oblique ion milling[J]. *J. Vac. Sci. Technol. A*, 1984, **2**(4): 1552~1557

16 L. F. Johnson. Evolution of grating profiles under ion-beam erosion[J]. *Appl. Opt.*, 1979, **18**(15): 2559~2574

\*\*\*\*\*

## φ140 mm 提拉法 Nd:GGG 晶体研制成功

中国科学院安徽光机所晶体材料研究室殷绍唐研究组经过数年的努力,解决了大口径 Nd:GGG 晶体生长中的诸多难题,在 2008 年底取得了重要进展,用提拉法生长出质量优良、无开裂的 φ141 mm Nd:GGG 晶体。

提拉法 Nd:GGG 是高功率大能量固体激光的

工作物质,它具有与 Nd:YAG 相近的激光性能,但其相对容易实现平界面生长,可克服晶体生长中的核心;同时 Nd:GGG 的熔点比 Nd:YAG 低了近 200 °C,更有利于生长大口径晶体毛坯;Nd<sup>3+</sup> 在 GGG 中的分凝系数是其在 YAG 中的 3~5 倍,更有利于生长光学质量均匀的晶体;它也具有优良的热学和机械性能。因此,提拉法 Nd:GGG 是获得高功率大能量中所需大口径激光工作物质的重要材料。解决大口径 Nd:GGG 晶体的提拉法生长技术是当前晶体生长的重要课题。

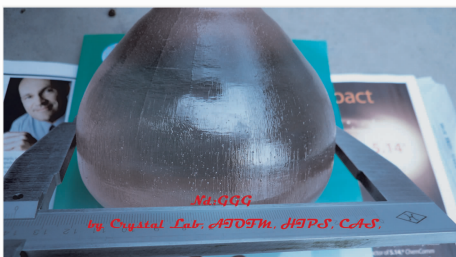


图1 φ141 mm 提拉法 Nd:GGG 晶体

Fig. 1 Nd:GGG crystal of φ141 mm grown by Czochralski method

中国科学院安徽光学精密机械研究所,  
安徽合肥 230031  
张庆礼

收稿日期:2009-02-08