

文章编号 : 0258-7025(2002)10-0915-05

相位掩膜特性对光纤光栅性能的影响

裴 丽, 宁提纲, 谢增华, 简水生, 李唐军, 延凤平
(北方交通大学光波所, 北京 100044)

提要 介绍了相位掩膜特性对光纤光栅(OFG)性能的影响。理论分析和实验均表明, 相位掩膜版的性能直接影响到啁啾光纤光栅功率谱的平坦度以及时延波动的大小, 由于时延波动是影响啁啾光栅色散补偿的一个重要因素, 因此对掩膜版的性能要求必须十分严格。通过掩膜版的选择以及紫外扫描曝光过程的控制, 制作出了高质量的啁啾光纤光栅, 时延波动小于 20 ps, 功率波动小于 1 dB。

关键词 相位掩膜, 光纤光栅, 时延波动

中图分类号 TN 253 **文献标识码** A

Influencing of Phase Mask Characteristic on Optical Fiber Grating (OFG) Performance

PEI Li, NING Ti-gang, XIE Zeng-hua,
JIAN Shui-sheng, LI Tang-jun, YAN Feng-ping
(Light-wave Technology Institute, Northern Jiao Tong University, Beijing, 100044)

Abstract In this article the influence of phase mask characteristic on OFG performance is introduced. The theory analysis and experiments show that the characteristic of the phase mask directly influence the power flatten coefficient and the time delay deviation(TDD) of the chirped OFG, then the TDD will influence dispersion effect of chirped OFG, so the parameters of the phase mask must be stricted. By choosing good quality phase mask and controlling the UV scan exposal course, the high quality OFG is fabricated which has the time delay deviation less than 20 ps and its reflectivity is flatness with ripple coefficient less than 1 dB.

Key words phase mask, optical fiber grating(OFG), ripple coefficient of time delay

1 引 言

近年来, 光纤光栅(OFG)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, 包括光发送、光放大、光纤色散补偿和光接收等等。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^[1]。

随着光纤光栅的重要性日益被人们所认识, 各种光纤光栅的制作方法层出不穷, 寻求最佳的光纤

光栅制作方法无疑具有重要的意义。相位掩膜法不依赖于入射光波长, 只与相位光栅的周期有关, 因此, 对光源的相干性要求不高, 大大简化了光纤光栅的制造系统。本文介绍了掩膜版刻槽深度、占空比的大小以及零级抑制情况等相位掩膜特性对光纤光栅性能的影响。

2 近场理论分析

图 1 中, Ψ_n 为第 n 级衍射的衍射角, θ 为相干平行光束的入射角, 满足光栅方程^[2]

收稿日期 2001-07-26; 收到修改稿日期 2001-09-25

基金项目: 国家“863”、国家自然科学基金(编号 69877001)及北方交通大学攀登基金资助项目。

作者简介: 裴丽(1970.8—)女, 山西人, 在读博士生, 主要从事高速光纤通信网及光纤通信关键技术等方面的研究工作。

E-mail: peilip@263.net

$$\sin \Psi_n - \sin \theta = n\lambda/d \quad n = -i, -i+1, \dots, j \quad (1)$$

i, j 分别为小于 $d(1 + \sin \theta)/\lambda$ 和 $d(1 - \sin \theta)/\lambda$ 的最大整数, d 为光栅周期。

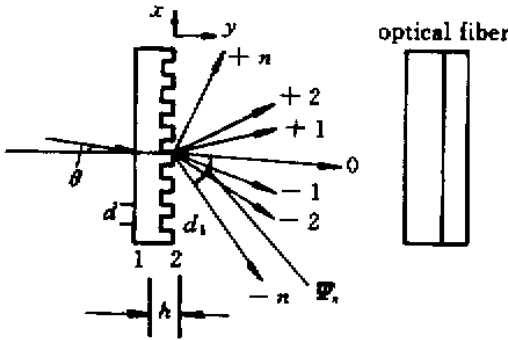


图 1 相位掩膜衍射场

Fig.1 Diffraction field of the phase mask

假定光场经过相位光栅后只发生周期性的相位延迟, 则 $y = 0$ 平面上的光场可表示为

$$E(x) = \exp\left(i \frac{2\pi x \sin \theta}{\lambda}\right) \times \begin{cases} \exp(i\varphi), & (m-1)d < x < (md - d_1) \\ 1, & (md - d_1) < x < md \end{cases} \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (2)$$

式中, φ 为相位掩膜表面凹凸部分的相对相位延迟, 可表示为

$$\varphi = \frac{2\pi h}{\lambda} \left(\frac{n_{si}^2}{\sqrt{n_{si}^2 - \sin^2 \theta}} - \frac{1}{\cos \theta} \right) \quad (3)$$

$$E(x) = \exp\left(i \frac{2\pi x \sin \theta}{\lambda}\right) \sum_{t=-\infty}^{+\infty} A_t \exp\left(\frac{i2t\pi}{d} x\right) \quad (4)$$

其中, n_{si} 为掩膜版材料的折射率。相位掩膜版后的衍射光场展开为傅里叶级数, 其中

$$A_t = \begin{cases} 1 - f[1 - \exp(i\varphi)] & t = 0 \\ i \frac{1}{2t\pi} [1 - \exp(i\varphi)] [1 - \exp(-i2t\pi)] & t = \pm 1, \pm 2, \dots \end{cases} \quad (5)$$

$f = d_1/d$ 为相位掩膜版表面刻槽的占空比。各级衍射光强为

$$I_0 = [A_0]^2 = 1 - 4f(1-f) \sin^2(\varphi/2) \quad (6)$$

$$I_t = [A_t]^2 = \frac{4 \sin^2(ft\pi)}{t^2 \pi^2} \sin^2(\varphi/2), t = 1, 2, \dots \quad (7)$$

由于光栅的写入波长一般为 248 nm 或 193 nm, 为了避免形成 1550 nm 波段光栅时会产生振幅较小的高频分量, 制作光纤光栅时最好采用垂直入射法。

2.1 掩膜版刻槽深度和占空比大小对零级抑制的影响

垂直入射时

$$\varphi = 2\pi h(n_{si} - 1)/\lambda \quad (8)$$

则根据(6)式

$$I_0 = 1 - 4f(1-f) \sin^2[\pi h(n_{si} - 1)/\lambda] \quad (9)$$

因此我们可以获得掩膜版刻槽深度 h 和占空比 f 与零级衍射效率 I_0 的关系, 如图 2 所示³¹。

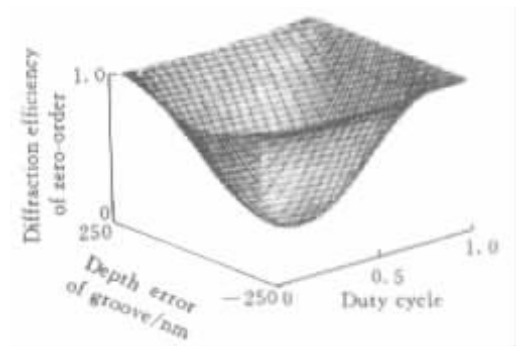


图 2 掩膜版刻槽深度和占空比与零级衍射效率的关系

Fig.2 Relationship among groove depth error, duty cycle and diffraction efficiency of zero-order

可见, 只有当 $f = 1/2, h = \lambda/\lambda(n_{si} - 1)$ 的理想状态下, 零级衍射效率为 0。且 $|\Delta f| \leq 0.09, |\Delta h| \leq 30 \text{ nm}$ 才能保证零级衍射效率抑制在 3% 之内。当零级衍射被完全抑制, 只存在 ± 1 级衍射光的理想掩膜条件下, 紫外光经过掩膜相位调制后衍射光的 ± 1 级交叉相干涉, 写入周期为掩膜周期一半的 Bragg 光栅。

2.2 理想掩膜条件下发散角的影响

假设激光能在 $(-\Delta\Phi/2, \Delta\Phi/2)$ 发散角范围内均匀分布, 光强对频率的分布为高斯型, 当零级衍射被完全抑制, 只存在 ± 1 级衍射光。即 $I_0 = 0$ 则⁴¹

$$I = 2I_1 [\sin(ky \tan \Psi_1 \Delta\Phi) \cos(2kx \sin \Psi_1 + 1)] \quad (10)$$

2.2.1 发散角为 0

$$\Delta\Phi = \alpha(\lambda = 248 \text{ nm}, \Delta\lambda = 1 \text{ nm}, d = 533 \text{ nm})$$

如图 3 所示。

可见, 光强在 x 方向为周期 $d/2$ 的周期分布, 干涉条纹的对比度与 y 和入射光波长无关, 因此制作光栅时无需窄线宽光源, 对光源的干涉性要求较低。

2.2.2 发散角不为 0

$$\Delta\Phi = 2 \text{ mrad}(\lambda = 248 \text{ nm}, \Delta\lambda = 1 \text{ nm}, d = 533 \text{ nm})$$

如图 4 所示。

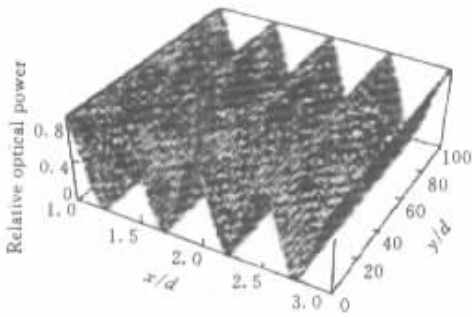
图3 理想掩膜 $\Delta\Phi = 0$ 时 x - y 平面形成干涉场分布

Fig.3 Interference field distribution at x - y plane for ideal phase mask ($\Delta\Phi = 0$)

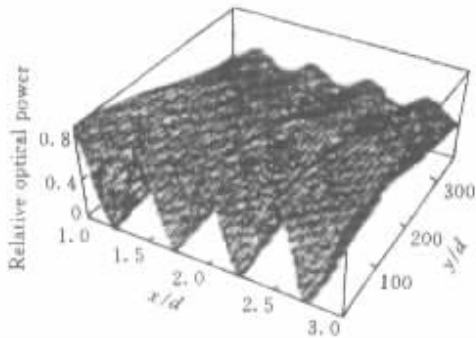
图4 理想掩膜 $\Delta\Phi \neq 0$ 时 x - y 平面形成干涉场分布

Fig.4 Interference field distribution at x - y plane for ideal phase mask ($\Delta\Phi \neq 0$)

可见,光强在 x 方向为周期 $d/2$ 的周期分布,但干涉条纹的对比度 γ 与入射光 λ 的发散角 $\Delta\Phi$ 和 y 有关系^[5]

$$\gamma = \sin(A\Delta\Phi y), \quad A = \frac{2\pi}{d} \frac{1}{\sqrt{1 - (\lambda/d)^2}} \quad (11)$$

发散角与 y 的乘积越小,干涉条纹的对比度越大。发散角一定,随着 y 的增大,干涉条纹的对比度下降,当 $y > \lambda/2 \tan \Psi \Delta\Phi$ 后^[6],对比度显著下降,边界难于识别。因此,制作光栅时,应当尽量减小光源发散角以及光纤与掩膜版的距离。

在相同实验条件下,当光栅距离掩膜版分别为 $150 \mu\text{m}$ $250 \mu\text{m}$ $400 \mu\text{m}$ 时,写入同样深度的光栅,所需曝光时间分别为 15 min 25 min 50 min 。可见,增大光纤与掩膜版距离写入光栅时,曝光时间明显加长,光栅生长速度降低,这表明随着离开掩膜版距离的增加,干涉场反衬度降低。

2.3 非理想掩膜条件下各级衍射的影响^[4,5]

零级衍射未被完全抑制,或存在 ± 1 级衍射光以及较弱的 ± 2 级衍射光时,假定光源发出的光为具有良好相干性的准单色光, Ψ_n 为第 n 级衍射的衍射角,设最大衍射级次为 m ,则掩膜版的近场光强分布由各级衍射光束之间的相互干涉给出^[7]

$$I = I_0 + \sum_{j=1}^m \sum_{i=0}^m 4 \sqrt{I_i I_j} \cos(kx \sin \Psi_i) \times \cos(kx \sin \Psi_j) \times \cos(ky \cos \Psi_i - ky \cos \Psi_j) \quad (12)$$

下面分两种情况进行讨论。令 $\Delta\Phi$ 为光源发散角, d 为光栅周期。取参数 $\Delta\Phi = 2 \text{ mrad}$, $\lambda = 248 \text{ nm}$, $\Delta\lambda = 1 \text{ nm}$, $d = 534 \text{ nm}$ 。

2.3.1 零级衍射被完全抑制,但存在 ± 1 级衍射光以及较弱的 ± 2 级衍射

由图5可见,离掩膜版较近时(图5(a), $y = 0 \sim 4d$),由于微小的距离差异等影响,光强在 x 与 y 方向都出现尖峰,在 x 方向主周期为 d ; y 增大(图

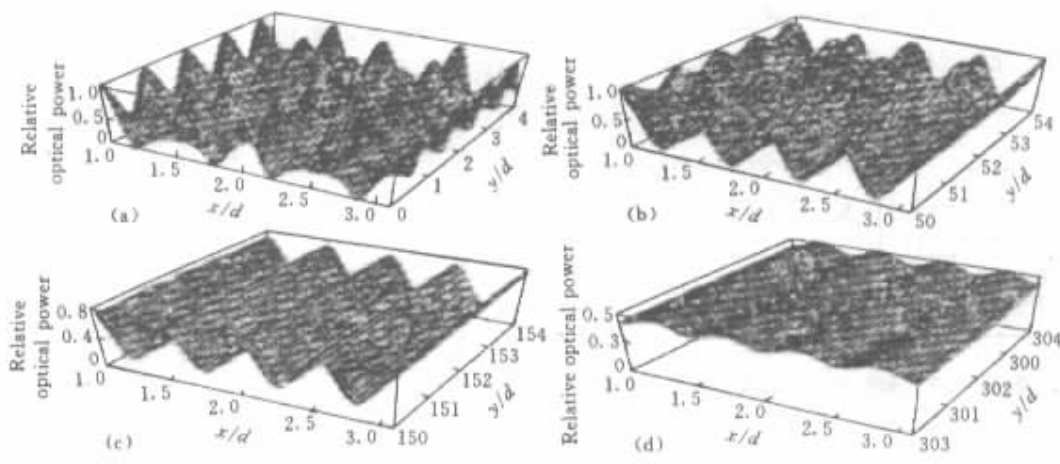
图5 非理想掩膜 x - y 平面形成的干涉场分布 ($I_0 = 0, I_1 = 0.2, I_2 = 0.02$)

Fig.5 Interference field distribution at x - y plane for non-ideal phase mask ($I_0 = 0, I_1 = 0.2, I_2 = 0.02$)

(b), $y = 50 \sim 54d$), 1级与2级衍射之间失去相干性, 使得图形的对比度降低; y 继续增大(图(c)), $y = 150 \sim 154d$), 只有 +1 与 -1 级衍射相干, 光强图

形近似呈余弦分布; y 进一步增大(图(d)), $y = 300 \sim 304d$), 所有衍射之间的相干性将全部丢失, 光强近似为均匀分布。

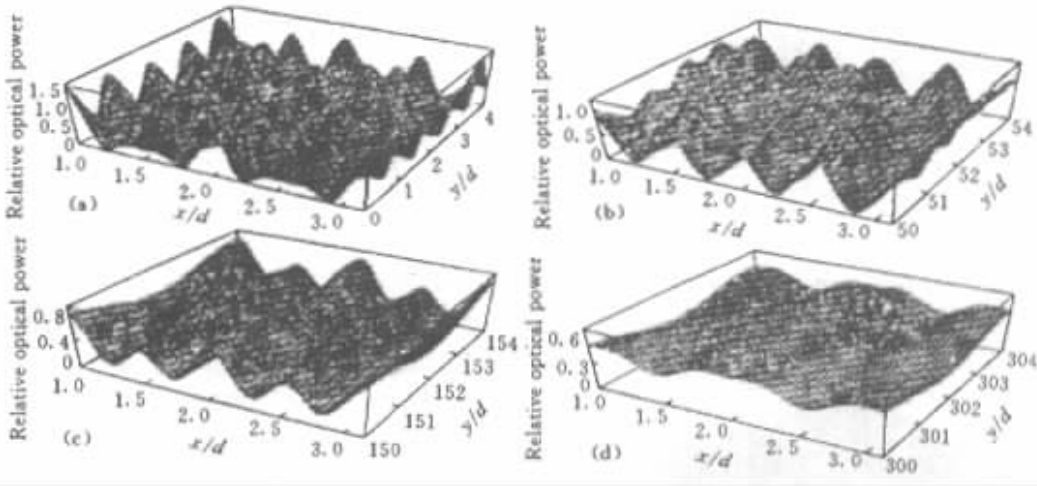


图6 非理想掩膜 x - y 平面形成的干涉场分布($I_0 = 0.01, I_1 = 0.2, I_2 = 0.02$)

Fig.6 Interference field distribution at x - y plane for non-ideal phase mask($I_0 = 0.01, I_1 = 0.2, I_2 = 0.02$)

2.3.2 零级衍射未被完全抑制, 且存在 \pm 级衍射光以及较弱的 ± 2 级衍射光

由图6可见, 由于零级衍射的存在, 严重影响了光强图形的形状。在 x 和 y 方向, 光强都呈周期分布。在 x 方向周期为 d , 相邻两列 x 方向呈周期分布的条纹之间存在 $d/2$ 的位移。随着 y 的增加, 由于光源具有有限的相干长度, 各级条纹几乎不相干, 将不存在明显的条纹分布。

3 实 验

由于光源有限的相干长度, 光纤应当尽量靠近掩膜放置, 以获得最好的折射率调制^[8,9]。采用垂直入射法制作光纤光栅的实验装置如图7所示。

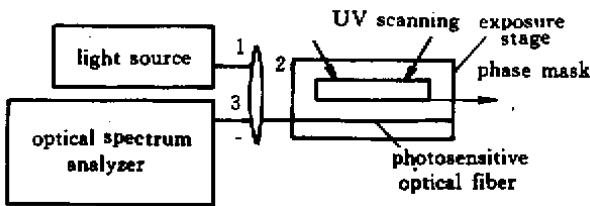


图7 光纤光栅制作实验装置

Fig.7 Experiment setting for OFG fabrication

光敏光纤为氢载光纤(10/125 μm 单模光纤, 实验前在室温, 110 atm 氢气中处理了大约8周)。紫

外光源采用工作波长为 248 nm 的 KrF 准分子激光器。由于掩膜版刻槽深度和占空比很难达到满足零级抑制的完全理想状态, 因此用 O_{th} 来表示掩膜版零级抑制的程度。光纤光栅在写入过程中, 将会受到较弱的零级衍射及 ± 2 级衍射的共同作用。表1给出了相同实验条件下, 三块不同参数掩膜版写入光纤光栅的最大功率谱波动及最大时延波动。掩膜版参数为: $\Delta_1 = 1071.66 + 0.4 \text{ nm}$, $O_{th1} = 2.7\%$; $\Delta_2 = 1070.56 + 0.4 \text{ nm}$, $O_{th2} = 1.44\%$; $\Delta_3 = 1069.4 + 0.4 \text{ nm}$, $O_{th3} = 0.4\%$ 。其中 Δ 表示掩膜版的周期。

由表1可见, 相同实验条件下, 对同一掩膜版, 准分子激光器的入射光功率越大, 最大功率谱波动及最大时延波动都相应地变大, 这是由于准分子激光器的入射光功率增大, 对应的光栅折射率调制加大, 而掩膜版并未处于理想的零级抑制状态, 相应的各种缺陷累积所致。如果准分子激光器的入射光功

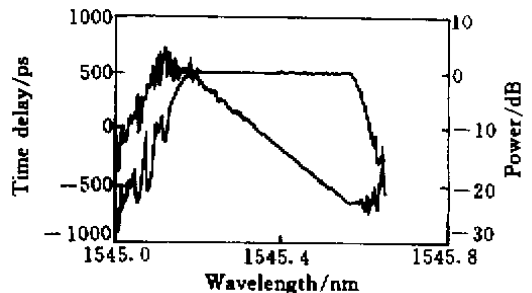


图8 时延波动小于 20 ps 的光纤光栅

Fig.8 OFG with time delay ripple less than 20 ps

率一定,则掩膜版零级衍射越小,光栅的质量越高。因此,获得高质量掩膜版对于制作高性能光纤光栅具有重要的意义。图 8 给出了选择低零级衍射掩膜

版,通过紫外扫描曝光过程的控制,制作出的宽带、低纹波系数啁啾光纤光栅,时延波动小于 20 ps,功率谱十分平坦,最大波动小于 1 dB。

表 1 实验数据

Table 1 Experiment data

Incident power of excimer laser/mJ	The maxim power ripple coefficient/dBm			The maxim time delay deviation/ps		
	Phase mask 1 #	Phase mask 2 #	Phase mask 3 #	Phase mask 1 #	Phase mask 2 #	Phase mask 3 #
70	1.7	1.0	0.8	47	29	20
134	2.3	1.5	1.2	51	31	23
202	2.7	2.2	1.9	68	33	26
300	3.2	2.6	2.3	79	41	29

参 考 文 献

- Liu Songhao, Du Weichong, Tan Huayao *et al.*. Dispersion compensation by chirped optical fiber grating in optical fiber communication system [J]. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2000, **20**(1) :24 ~ 28 (in Chinese)
- Zhang Yongsheng, Yu Ke, Jiang Desheng *et al.*. Fabricating technology of fiber grating with phase masks [J]. *Optical Technology* (光学技术), 1999, (1) :24 ~ 27 (in Chinese)
- Chen Shaowu. Analysis on tolerance for fabrication error of phase mask for UV-written fiber Bragg grating [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser* (光电子 · 激光), 1998, **9**(6) :469 ~ 471 (in Chinese)
- Liu Yonghong, Huang Dexiu, Wang Li *et al.*. Theory analysis of grating production with phase masks [J]. *Study on Optical Communications* (光通信研究), 1997, (2) :46 ~ 50 (in Chinese)
- Tao Zhen-ning, Wu Deming. The interference of UV laser required by fabricating Bragg grating by UV exposure [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser* (光电子 · 激光), 2000, **11**(3) :270 ~ 273
- P. E. Dyer, R. J. Farley, R. Giedl. Analysis of grating formation with excimer laser irradiated phased masks [J]. *Opt. Comm.*, 1995, **115**(3 A) :327 ~ 334
- S. J. Mihailov, F. Bilodeau, K. O. Hill *et al.*. Comparison of fiber grating dispersion compensation made with holographic and E-beam written phase masks [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(5) :572 ~ 574
- Pei Li, Xie Zenghua, Ning Tigang *et al.*. Bragg gratings written by photoimprinted in optical fibers [J]. *Optical Technology* (光学技术), 2000, **26**(4) :375 ~ 376 (in Chinese)
- Zhang Peikun, Li Yulin, Liu Jiaying *et al.*. Improvement to dispersion property of a linearly chirped grating by optimizing the distribution of coupling coefficient [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1999, **A26**(8) :696 ~ 700 (in Chinese)