

文章编号： 1001-4322(2003)05-0455-04

用于 ICF 驱动器的分频光栅两种工艺误差分析*

陈德伟, 李永平

(中国科学技术大学 物理系, 安徽 合肥 230026)

摘 要: 对用于 ICF 驱动器分频光栅的刻槽深度进行了优化,使其具有更优的分频效果。在此基础上,对制作工艺带来的占空比误差和塌边结构进行了分析,给出了分频光栅具有良好分频效果时工艺上所能允许的误差范围。

关键词: ICF 系统; 分频光栅; 占空比; 塌边结构; 允许误差

中图分类号: TL632

文献标识码: A

在惯性约束聚变(ICF)的高功率激光驱动系统中,末端靶场起着极其重要的光束变换及光束整形作用^[1],其中光束变换包括多光束的合并、多频率光束的分离等。多频率光束的分离通常采用分频光栅(CSG:Color Separation Grating)来实现,分频光栅是一种三台阶结构,它几乎 100%地可以让三倍频能量无衍射地通过,而将绝大部分的基频光和倍频光衍射到较高衍射级次上^[2]。但是要将分频光栅最终应用于 ICF 系统,还需要对其制作工艺所带来的误差进行更精确的分析,文献[3,4]对纵向的刻蚀深度误差和横向的对位误差进行了分析。除此之外,工艺中还会出现塌边结构以及占空比的误差。光栅制作采用全息-离子束刻蚀工艺,在离子束刻蚀工艺过程当中,常常会将矩形面型刻蚀为梯形,称为塌边结构;工艺占空比误差与对位误差都是横向误差,产生的机理却不同,对位误差是刻蚀过程中掩模板没对准造成的,工艺占空比误差是掩模板没有按照理想的占空比制作造成的。作为对横向误差分析的补充,本文也对工艺占空比误差进行了分析。

1 衍射效率的推导

当具有三种频率的光通过分频光栅时,不同频率的光将被色散,能量将在各衍射级重新分配。对于我们所采用的这类位相型闪耀光栅,其透过率函数可写为

$$T_s(x) = \sum_m (x - m) * \{ \text{rect}[(x - m) / \Lambda] \} \quad (1)$$

式中: Λ 为光栅周期; * 号表示卷积; rect 表示矩形函数; (x) 为分频光栅在每个周期内的位相分布。将 $T_s(x)$ 进行傅里叶展开,可得第 m 级衍射光的效率

$$\eta_m = \left| \int_0^{\Lambda} (f - m/\Lambda) (x) \exp(-i2\pi f x) dx \right|^2 \quad (2)$$

从式(2)可以看出,周期一定的光栅,其衍射效率只决定于 (x) ,理想结构的分频光栅在文献[3]中进行了详细的分析,位相分布与衍射效率分别见文献[3]中式(7)和式(10)。对于有占空比误差和塌边结构的分频光栅,其结构发生了变化,但变化的只是每个周期的结构,周期大小没有发生变化,所以透过率函数形式 $T_s(x)$ 是不变的,但每个周期内的位相分布 (x) 却发生了变化,衍射效率也相应地会发生变化。以下分别对这两种结构进行分析。

1.1 塌边结构的影响

目前对工艺误差的分析多见于对刻蚀深度误差和对位误差的分析,然而实际的分频光栅并非是严格的阶梯形状结构,制作过程当中不可避免地会出现塌边情况,每个台阶将从矩形结构变为梯形结构,出现塌边结构的分频光栅结构示意图如图 1 所示,图中第一个周期虚线所示为理想结构。

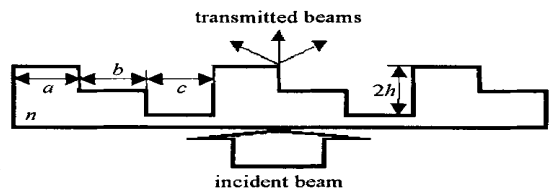


Fig. 1 Structure of CSG with trapezoid
图 1 具有塌边结构的分频光栅

* 收稿日期:2002-10-10; 修订日期:2002-12-18
基金项目:国家 863 计划项目资助课题
作者简介:陈德伟(1976-),男,博士生,从事衍射光学研究;E-mail:tandier@263.net。

分频光栅的制作需要用两套模板各刻蚀一次,由于两次的刻蚀深度都相等,我们假定塌边的斜率绝对值都相等,设塌边与 x 轴夹角为 θ 。理想结构时 $\theta = 90^\circ$,当考虑塌边的影响时 $\theta < 90^\circ$,三种频率光束各级衍射光的效率都将发生变化。根据分频光栅的面型结构,整个周期可以按照平边和斜边分为 6 个部分,位相函数表示为

$$\phi(x) = \begin{cases} \exp[i k_0(n-1)x \tan \theta], & 0 < x < 2h/\tan \theta \\ \exp[i k_0(n-1)2h], & 2h/\tan \theta < x < \frac{1}{3} + h/(2\tan \theta) \\ \exp[i k_0(n-1)(2h-x \tan \theta)], & \frac{1}{3} + h/(2\tan \theta) < x < \frac{1}{3} + 3h/(2\tan \theta) \\ \exp[i k_0(n-1)h], & \frac{1}{3} + 3h/(2\tan \theta) < x < 2\frac{1}{3} + h/(2\tan \theta) \\ \exp[i k_0(n-1)(h-x''\tan \theta)], & 2\frac{1}{3} + h/(2\tan \theta) < x < 2\frac{1}{3} + 3h/(2\tan \theta) \\ \exp[i k_0(n-1)0], & 2\frac{1}{3} + 3h/(2\tan \theta) < x < \end{cases} \quad (3)$$

式中: $k_0 = 2\pi/\lambda$; h 为每次刻蚀的刻槽深度; n 为波长为 λ 的光在光栅介质中的折射率; $x' = x, x'' = x - \frac{1}{3} - h/(2\tan \theta), x''' = x - 2\frac{1}{3} - h/(2\tan \theta)$ 分别对应斜边处横坐标的值。将(3)式代入(2)式并经过化简可得各级衍射波的衍射效率为

$$m = \left| \left[\begin{aligned} & Q \left\{ \int_{-\frac{2}{3} + \frac{3h}{2\tan \theta}}^{\frac{2h}{\tan \theta}} \exp(-i2\pi m x/\lambda) dx + \int_0^{\frac{2h}{\tan \theta}} \exp[i k_0(n-1)x \tan \theta] dx \right\} + \\ & Q \left\{ \int_{\frac{1}{3} + \frac{3h}{2\tan \theta}}^{\frac{2h}{\tan \theta}} \exp(-i2\pi m x/\lambda) dx + \int_{\frac{1}{3} + \frac{3h}{2\tan \theta}}^{\frac{2}{3} + \frac{h}{2\tan \theta}} \exp[-i k_0(n-1)x \tan \theta] dx \right\} + \\ & Q''' \left\{ \int_{\frac{2}{3} + \frac{3h}{2\tan \theta}}^{\frac{2}{3} + \frac{3h}{2\tan \theta}} \exp(-i2\pi m x/\lambda) dx + \int_{\frac{2}{3} + \frac{3h}{2\tan \theta}}^{\frac{2}{3} + \frac{h}{2\tan \theta}} \exp[-i k_0(n-1)x''\tan \theta] dx \right\} \end{aligned} \right]^2 \quad (4)$$

式中: $Q = \exp[i k_0(n-1)0], Q = \exp[i k_0(n-1)2h], Q''' = \exp[i k_0(n-1)h]$ 分别为平边处的位相分布,也就是理想结构时 3 个台阶的位相分布。

1.2 占空比误差的分析

占空比误差来自掩模板制作上的误差,理想的分频光栅具有宽度完全相等的 3 个台阶,也就是从上到下两光栅层的占空比必须为 $1/3$ 和 $2/3$ 。为什么非得选择这样的占空比? 我们需要对占空比有一定变化的分频光栅进行分析。一般认为,横向误差主要来自于对位误差的影响,掩模板制作误差的影响相对较小,然而只要是采用套刻工艺就必然会出现这种误差,当需要的掩模板不只一套时,其对器件性能的影响也就更加值得重视。图 2 所示为考虑了占空比误差的分频光栅结构图,与理想结构相比 3 个台阶的宽度不再完全相等,但每次刻蚀的刻槽深度 h 不变。则每个周期内的位相分布 $\phi(x)$ 就表示为

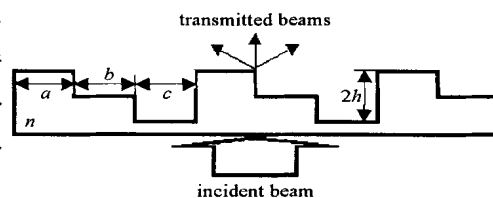


Fig. 2 Structure of CSG with duty cycle error
图 2 分频光栅的占空比误差示意图

$$\phi(x) = \begin{cases} \exp[i k_0(n_2 - n_1)2h], & 0 < x < a \\ \exp[i k_0(n_2 - n_1)h], & a < x < a + b \\ \exp[i k_0(n_2 - n_1)0], & a + b < x < a + b + c \end{cases} \quad (5)$$

式中: $a = (1 + \delta_1)/3; c = (1 - \delta_2)/3; b = \frac{2}{3} - a - c$; δ_1, δ_2 分别为两光栅层占空比的相对误差。将(5)式代入(2)式求得第 m 级衍射光的衍射效率

$$m = \left| \left[\begin{aligned} & \exp[i k_0(n_2 - n_1)2h] \exp(-i\pi m a/\lambda) \text{sinc}(\pi m a/\lambda) + \\ & \exp[i k_0(n_2 - n_1)h] \exp[-i\pi m(2a+b)/\lambda] \text{sinc}(\pi m b/\lambda) + \\ & \exp[i k_0(n_2 - n_1)0] \exp[-i\pi m(2a+2b+c)/\lambda] \text{sinc}(\pi m c/\lambda) \end{aligned} \right]^2 \quad (6)$$

当 $\delta_1 = \delta_2 = 0$ 时,式(6)即为文献[3]中第(10)式,也就是理想的分频光栅各级衍射效率公式;同样,当 $\theta = 90^\circ$ 时,式(4)也转化为文献[3]中第(10)式。

2 计算结果及分析讨论

对于用于 ICF 系统的分频光栅来说,要分离的三种频率光束分别具有波长 $1.053, 0.5265$ 和 $0.351\mu\text{m}$,分

别称为基频光,倍频光和三倍频光,以下所讨论的衍射效率都特指零级衍射效率。

2.1 刻槽深度的优化

ICF 系统要求分频光栅能对三倍频光的衍射效率大于 95%,对基频光和倍频光的衍射效率都要小于 1%,相对而言,对基频光和倍频光衍射效率的要求更加严格。理想分频光栅的参数为 $n(0.351\mu\text{m}) = 1.5672, n(0.5265\mu\text{m}) = 1.5436, n(1.053\mu\text{m}) = 1.5254, \Lambda = 79\mu\text{m}, h = 0.62\mu\text{m}$ 。在所给参数下分频光栅的衍射效率如表 1 所示,从中可以看出,基频光和倍频光的衍射效率都满足 ICF 系统的要求,但是制作工艺的宽容度却不够,很小的工艺误差就会造成基频光或倍频光束的衍射效率大于 1%。从式(5)和式(6)中可以看出,刻槽深度的微小变化会引起位相分布发生变化,从而直接造成衍射效率发生变化,所以可以通过对刻槽深度的微调来达到优化光栅分频效果的目的。给予 h 一个微小变化后的衍射效率为

表 1 优化前的光栅衍射效率

Table 1 Diffraction efficiency before optimization

| diff.order | - 2 | - 1 | 0 | 1 | 2 |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 1.053 μm | 0.168 | 0.005 | 0.008 | 0.673 | 0.0012 |
| 0.527 μm | 0.002 | 0.668 | 0.009 | 0.009 | 0.167 |
| 0.351 μm | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |

表 2 优化后的光栅衍射效率

Table 2 Diffraction efficiency after optimization

| diff.order | - 2 | - 1 | 0 | 1 | 2 |
|---------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1.053 μm | 0.1699 | 0.0020 | 0.0033 | 0.6796 | 0.0005 |
| 0.527 μm | 0.0002 | 0.6821 | 0.0013 | 0.0010 | 0.1705 |
| 0.351 μm | 0.0021 | 0.0069 | 0.9775 | 0.0085 | 0.0017 |

$$m = \left| \frac{1}{3} \begin{pmatrix} \exp[i k_0 (n_2 - n_1) 2(1 +) h] \exp(- i m/3) \text{sinc}(m/3) + \\ \exp[i k_0 (n_2 - n_1) (1 +) h] \exp(- i m) \text{sinc}(m/3) + \\ \exp[i k_0 (n_2 - n_1) 0] \exp(- i 5 m/3) \text{sinc}(m/3) \end{pmatrix} \right|^2 \quad (7)$$

改变 h 的值分别计算三种频率光的衍射效率,使得基频光和倍频光的衍射效率更小,而三倍频光的衍射效率仍然接近 100%,最后得到当 $h = 0.637\mu\text{m}$ 时,分频效果有明显改善。优化后的分频光栅计算结果如表 2 所示,与表 1 相比,基频光和倍频光的衍射效率更小,分频效果更好,同时在工艺制作上也具有更高的宽容度。

2.2 塌边结构的影响

从(4)式可以看出,塌边结构对分频效果的影响可以归结为斜边倾角 θ 的影响。根据(4)式,当 θ 改变时衍射效率的变化如图 3 所示。从图 3 可以看出,斜边坍塌得越厉害(倾斜角越小),三倍频光的衍射效率越小,基频光与倍频光的衍射效率越大。当倾斜角大于 70° 时,三倍频光的衍射效率都大于 95%,基频光与倍频光的衍射效率都小于 1%,能很好地满足 ICF 系统的要求;当倾斜角更小时,三倍频光的衍射效率将小于 95%,无法满足 ICF 系统的要求。从图 3 还可以看出,塌边结构对三倍频光的影响更甚于对基频光和倍频光的影响。

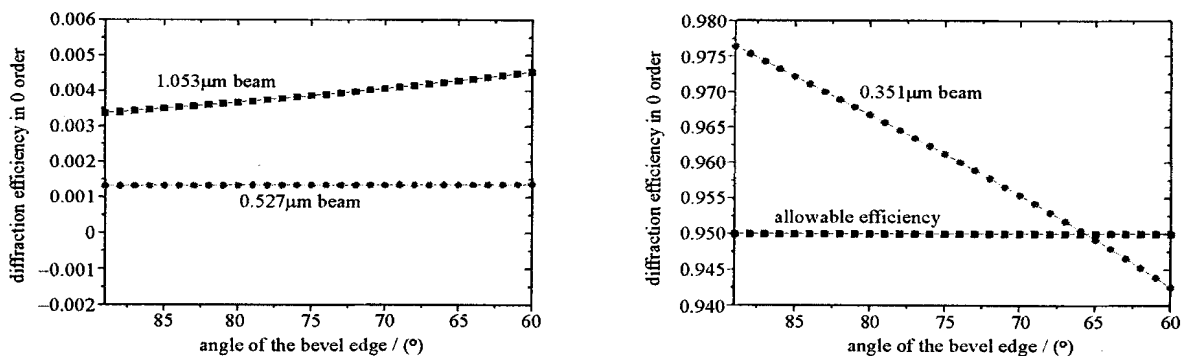


Fig. 3 Diffraction efficiency of trapeziform grating

图 3 塌边结构光栅的衍射效率

2.3 占空比误差分析

式(6)为具有占空比误差分频光栅的衍射效率公式,该式表明,分频光栅两个台阶所对应的占空比误差改变(分别对应于参数 d_1 和 d_2 的改变),衍射效率也随之改变,如图 4,5 所示。由于对刻蚀深度进行了优化,每个台阶对三倍频的位相延迟不再是 2π 的整数倍,那么占空比误差就会影响到它的衍射效率,但总的说来影响不大,这可以从图 4 中看出来。

相比较而言,占空比误差对基频光和倍频光的影响要严重得多。从图 5 中可以看出,基频光和倍频光的衍

射效率都有一个较小的区域,在这个区域内它们的衍射效率远小于 1%,但是这两个区域并不重叠,在基频光衍射效率的极小值附近倍频光的衍射效率很大,相反在倍频光衍射效率的极小值附近基频光的衍射效率却很大。可见没法找到这样一个区域使得基频光和倍频光的衍射效率都变得更小,占空比误差都会降低分频的效果,如果误差在所难免,唯一可以使分频光栅满足要求的是 δ_1 和 δ_2 同时增加或者同时减小,那么在工艺上可以允许 $\pm 10\%$ 的误差,如果周期为 $79\mu\text{m}$,也就是 $\pm 2.6\mu\text{m}$ 。应该尽量避免 δ_1 和 δ_2 只有一个变化的情况发生,这样的话所能允许的误差范围将变小,最好不要出现一个增大一个减小的情形,它所能允许的误差范围将更小,大约是 $\pm 4\%$,也就是 $\pm 1\mu\text{m}$ 。

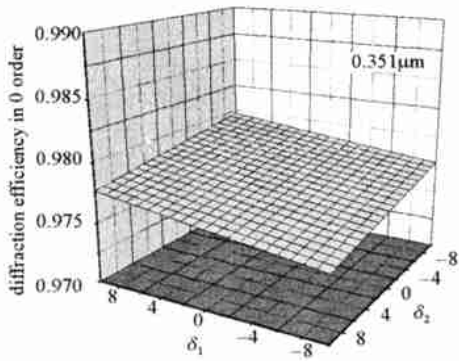


Fig. 4 Effect of duty cycle error on $0.351\mu\text{m}$ beam
图 4 占空比误差对三倍频光的影响

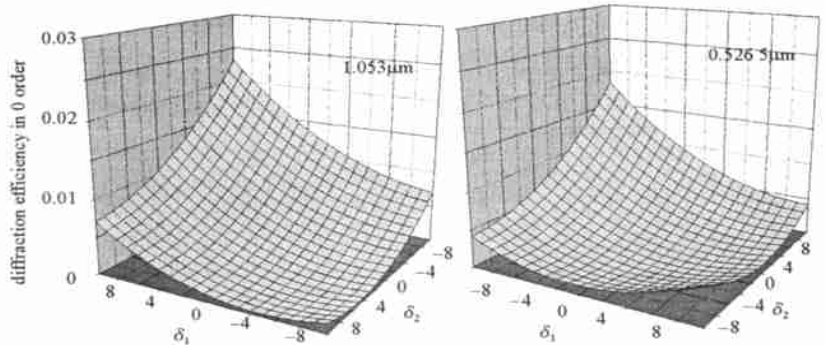


Fig. 5 Effect of duty cycle error on $1.053\mu\text{m}$ and $0.5265\mu\text{m}$ beam
图 5 占空比误差对基频光和倍频光的影响

3 结 论

首先对分频光栅的刻蚀深度进行了优化,使得基频光和倍频光的衍射效率更小,而三倍频的衍射效率仍然在 ICF 系统所要求的范围内,在此基础上进行工艺误差宽容度分析。

工艺上不可避免的塌边结构,对分频效果的影响比较小,只要斜边倾角在大于 70° 的范围内,就能保证具有良好的分频效果。

相对而言,占空比误差对分频效果的影响要稍大一些,对本文所设计的 $79\mu\text{m}$ 的光栅,掩模板可以有大约 $2.6\mu\text{m}$ 的误差。如果对周期更大的光栅,将具有更大的宽容度。

参考文献:

- [1] Wang W, Li T, Li Y P. A hybrid algorithm for the design of DOE in uniform illumination[J]. *Optics Communications*, 2000, **181**:261—265.
- [2] Dixit S N, Rushford M C, Thomas I M, et al. Color separation gratings for diverting the unconverted light away from the NIF targets[A]. 2nd annual international conference on solid-state lasers for applications to Inertial Confinement Fusion, SPIE[C]. 1996, **3047**:463—470.
- [3] 王 炜,徐俊中,李永平,等.用于分频的闪耀光栅设计及衍射行为的研究[J].光电工程,2000,**27**(2):39—42.(Wang W, Xu J Z, Li Y P, et al. Design of blazed grating used for frequency division and study on its diffraction action. *Optoelectronic Engineering*, 2000, **27**(2):39—42)
- [4] 高福华,蔡海涛,粟敬钦,等.用于 ICF 激光驱动器的谐波分离器制作误差宽容度研究[J].强激光与粒子束,2000,**12**(6):719—722.(Gao F H, Cai H T, Su J Q, et al. Study on tolerance of the fabrication errors for color separation gratings applied in ICF. *High Power Laser and Particle Beams*, 2000, **12**(6):719—722)

Analysis on two technologic errors of color separation grating used for ICF

CHEN De-wei, LI Yong-ping

(Department of Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: In this paper, the depth of color separation grating applied in ICF system is optimized firstly for good separating effect. After this, duty cycle error and the trapezoid structure are analyzed. A probable scope of technologic error that make the color separation grating have good effect is given in the end.

Key words: ICF system; Color separation grating; Duty cycle; Trapezoid structure; tolerance