

文章编号: 1001-4322(2004)02-0177-04

# 色分离光栅镀膜减反技术研究\*

杨春林, 许 乔, 杨李茗, 周礼书, 张清华

(成都精密光学工程研究中心, 四川 成都 610041)

**摘 要:** 根据惯性约束聚变系统技术要求, 提出一种镀膜减反方案, 以解决现有光栅由于元件表面反射影响衍射效率的问题。对色分离光栅镀膜减反技术进行了详细的分析, 根据标量理论给出了镀膜光栅的各项技术要求, 优化了光栅结构参数。模拟计算结果发现, 光栅表面反射几乎完全消除, 表明可以通过色分离光栅镀膜减反提高衍射效率的目的。该镀膜光栅刻槽深度的优化值为  $2.84\mu\text{m}$ , 膜厚为等效  $1/4$  波长, 即  $71.2\text{nm}$ 。

**关键词:** 色分离光栅; 衍射效率; 溶胶-凝胶膜; 减反技术

中图分类号: O437.4 文献标识码: A

谐波分离是惯性约束聚变(ICF)实验中的一项关键技术, 其作用在于将三倍频光从混有基频、二倍频光的输出光束中分离出来, 从而实现高精度聚焦打靶。惯性约束聚变驱动器对谐波分离的主要技术要求有: 谐波分离后, 三倍频光在零级位置保持尽可能高的能量利用率; 色分离小于 2%; 实现谐波分离的器件应具有高的抗激光损伤阈值等。通常使用专门设计的色分离光栅(CSG)来实现这些要求。

然而, 国内现有报道的 CSG 光栅的设计, 都没有考虑消除光栅表面的菲涅耳反射, 这对提高光栅的能量利用率是很不利的。本文提出在设计时就考虑在光栅表面进行镀膜减反, 从而获得性质优良的 CSG 光栅。

## 1 CSG 光栅的设计原理

1991 年, Veldkamp 提出了二元光学元件深刻蚀<sup>[1,2]</sup>的思想。所谓深刻蚀, 就是将原来二元光学元件制作的 2 位相深度加深到 2 的整数倍。刻蚀深度的加大赋予了元件一些新的特性, 最主要的优点是, 当二元光学元件的浮雕深度加深到 2 的整数倍时, 不会影响原元件设计光波长的衍射场的分布, 但会改变其它不同波长成分光波的衍射场分布。找出深刻蚀调制其它成分波长的规律, 从而获得对该波长入射光所希望的调制, 实现元件的多功能集成, 这就是一种多波长分离元件设计思想。

按 ICF 实验要求, 谐波分离要求混合光通过光栅后, 基频光(1060nm)和二倍频光(530nm)分别被衍射到正负一级, 三倍频光(351nm)仍在零级。为此, 通常设计一个三台阶的光栅结构, 如图 1 所示。三台阶对三倍频光的相位延迟分别为  $0, 2\pi, 4\pi$ , 各台阶宽度相同, 周期为  $T$ 。光栅周期  $T$  决定了基频光和二倍频光的分离角, 参考现阶段 ICF 系统的技术要求, 并依据光栅方程, 我们选取  $T = 30\mu\text{m}$ , 这样, 对基频光的分离角(一级衍射)为  $2.01^\circ$ , 对二倍频光的分离角为  $1.01^\circ$ 。

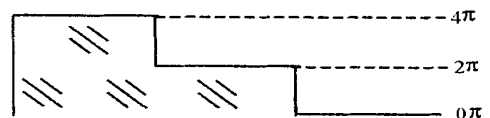


Fig. 1 Structure of the CSG

图 1 CSG 光栅结构

但是, 由于石英对不同频率的光波存在色散, 实际光程与光的波长有关, 所以, 我们需要对光栅的设计参数进行优化。设光栅的台阶深度为  $h$ 。由于  $T$  远大于波长, 可利用标量衍射公式计算衍射效率<sup>[2]</sup>

$$m = \left| \frac{1}{T} \int_0^T t(x) \exp[i(k_{0y} - k_{my})f(x) - im \frac{2\pi}{T} x] dx \right|^2 \quad (1)$$

式中:  $m$  是  $m$  级衍射效率,  $m$  是衍射级次;  $t(x)$  是表面透过率函数;  $k_{0y}$  和  $k_{my}$  分别是入射光和第  $m$  级衍射光波数的  $y$  分量,  $y$  坐标方向与光栅条纹平行;  $f(x)$  是描述光栅槽形的函数, 根据对基频光和二倍频光的分离角和衍射效率要求, 我们就可以确定  $h$  的具体值。

## 2 光栅镀膜减反技术原理

裸光栅表面存在菲涅耳反射, 因此光的透过率  $t(x) < 1$ , 这就影响了三倍频光的利用率。我们期望能够通

\* 收稿日期: 2003-07-02; 修订日期: 2003-09-24

基金项目: 国家 863 计划项目资助课题

作者简介: 杨春林(1972—), 男, 硕士, 工程师, 四川泸县人, 现主要从事衍射光学及微光学方面的工作; E-mail: yangchunlin@hotmail.com。

过在光栅表面镀增透膜,从而减小三倍频光的菲涅耳反射。

对光栅镀膜有两种方案,即仿形膜和平面膜,如图 2 所示,  $d_f$  为膜厚。

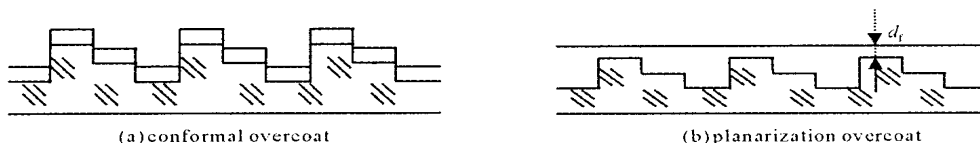


Fig. 2 Structure of the sol-gel film

图 2 光栅表面镀膜示意

仿形膜的制作方案复杂,工艺上难以保证膜的形状与裸光栅一致,所以我们只讨论镀平面膜的情况。平面膜减反射的原理是,对三倍频光而言,CSG 光栅面会对入射光产生大约 3.7% 的反射,反射光能量分布在各个衍射级。如果用某种沉积工艺在裸光栅上沉积一层 sol-gel 膜,使得膜平面的菲涅耳反射与光栅的零级反射光产生干涉,由于位相差可以设计为  $\pi/2$  而干涉相消,从而减小或消除光栅的反射损耗,参见图 3。

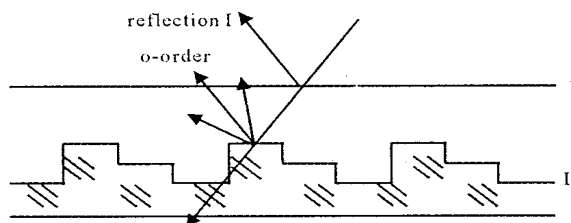


Fig. 3 Principle of the anti-reflection gratings with the sol-gel film

图 3 平面 sol-gel 膜减反原理示意图

考虑平行光垂直入射或小角度入射的情况。空气-膜界面 I 和膜-石英界面 II 都会产生反射光,从远场的角度来看, I 面产生反射平行光, II 面是光栅面,它产生一系列反射光,其中只有零级光与 I 面反射光平行。因此,当且仅当 II 面反射光主要集中在零级时,这种平面镀膜才能起到良好的减反效果。

上面仅简单的依据双光束干涉原理作了解释。根据麦克斯韦方程可以给出一个更为严格的解释:由于膜层引入了新的边界条件,从而造成了光能流的重新分配,原来反射光的能量被转移到了透射光中<sup>[3]</sup>。

要使得光栅面 II 的反射光主要集中在零级,则要求该面是一等效平面或者台阶光程差是  $\lambda/2$  的整数倍。一般情况下,对透射光波前是等效平面的台阶设计对反射光并非是等效平面,参见图 1。列出减反射 CSG 需满足的条件为(2)式,这样光栅面对透射和反射的三倍频光都是等效平面,透射和反射光也都集中在零级。

$$\begin{cases} (n_s - n_f) h/2 = k\lambda \\ n_f h = k\lambda \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $n_s, n_f$  分别是石英和膜材料折射率;  $h$  是光栅槽深;  $k, k$  是任意整数;  $\lambda$  是三倍频光波长。式(2)是不定方程,其中的未知量光栅  $h$  和膜材料折射率  $n_f$  有多个解,实际上通常选择物理上易于实现的情况。这里我们选择 sol-gel 膜对三倍频光的折射率为  $n_f = 1.233$ ,可以满足要求。

仍选择如图 1 所示的光栅结构,由于膜材料填充的影响,光栅的台阶高度要大一倍左右,计算出镀膜后光栅面 II 反射光的各级衍射效率<sup>[2]</sup>。

$$m = \left| \frac{1}{T} \int_0^T R_2 \exp(i\phi(x) - im \frac{2\pi}{T}x) dx \right|^2 \quad (3)$$

式中:  $\phi(x)$  是等效反射光栅造成的位相调制,它与台阶深度和填充膜材料折射率有关,可以写成  $\phi(x) = (4\pi/\lambda) n_f f(x)$ ,其中  $f(x)$  是前面提到的光栅槽形函数。另外定义  $R_1, R_2$  分别是空气-膜面以及膜-熔石英界面的振幅反射率。

当垂直入射或小角度入射时,界面振幅反射率  $\tilde{R} = \frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1}$ ,所以  $R_1 = 0.1, R_2 = 0.091$ 。根据光干涉原理,可以将镀膜后光栅面的强度反射率写为

$$|R|^2 = R_1^2 + R_0^2 + 2R_1 R_0 \cos\phi \quad (4)$$

式中  $\phi$  就是薄膜-空气面反射光与薄膜-石英面反射光之间的相位差,  $R_0$  是根据公式(3)计算得到的零级衍射效率。从式中可以看出,当  $\phi = \pi$  时能够得到最小的反射率。

介质光栅的各级反射光的能量和等于相同介质平面菲涅耳反射光能量,这在标量近似的条件下是正确的。当光栅周期接近光波长,标量近似不能满足(比如布拉格光栅)时,光栅的各级反射光的能量和将不等于平面菲

涅耳反射光能量,采用前面的减反膜方法不适用。文中讨论的 CSG 光栅满足标量近似。

实际上,光栅面比较容易满足对透射和反射的三倍频光都是等效平面这个条件,即符合公式(2),因而对 CSG 光栅的整体设计带来的附加影响是较小的。

### 3 数值模拟

如果 CSG 光栅不镀膜,利用公式(1)对光栅衍射效率进行数值模拟,结果如图 4 所示,图中基频光由实线表示,二倍频光由虚线表示。计算时采用的光波长为 0.35,0.53,1.06 $\mu\text{m}$ ,其折射率分别为  $n_{0.35} = 1.48$ ;  $n_{0.53} = 1.46$ ;  $n_{1.06} = 1.45$ 。如图可见,若选择基频光和二倍频光零级透过最小,则光栅高度  $h = 1.55\mu\text{m}$ ,若选择三倍频光零级透过率最大,则光栅高度最优值为  $h = 1.47\mu\text{m}$ ,最大透过率为 96.8%。

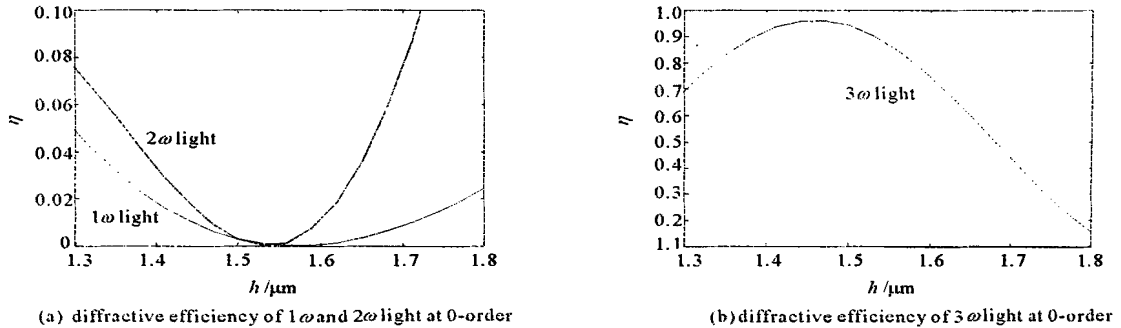


Fig. 4 Diffraction efficiency of the bare gratings

图 4 未镀膜的光栅的零级衍射效率

为了减小三倍频光透过损耗,采用前面阐述的光栅面镀膜方案,根据(3)式计算模拟得到光栅面反射光归一化衍射效率与光栅槽深的关系,如图 5 所示。可见,最强零级反射光出现在  $h = 2.58, 2.84, 3.14\mu\text{m}$  附近。如果选择光栅槽深为该值,并选择膜厚  $d_f$ (如图 2)为等效 1/4 波长,根据公式(3)的计算结果,光栅面的反射光几乎完全被抵消。从图 5 中还可以看出,与未镀膜光栅相比,镀膜光栅的三倍频零级反射光对光栅槽深的关系非常敏感, sol-gel 膜材料的折射率也对反射率的影响非常敏感,这要求对制造工艺进行仔细控制。图 6 是模拟计算的镀膜光栅对各波长激光的零级衍射效率。图中实线表示基频光的衍射效率,虚线表示二倍频光的衍射效率。由图可见,基频光透过最小时对应光栅高度约为  $h = 3.25\mu\text{m}$ ;二倍频光透过最小时对应光栅高度约为  $h = 3.1\mu\text{m}$ ;如果仍然选择三倍频光零级透过率最大,则光栅高度最优值为  $h = 2.84\mu\text{m}$ ,最大透过率约等于 1;此时基频光和二倍频光的透过率(零级衍射)仍然维持在 0.02 左右的较低水平。

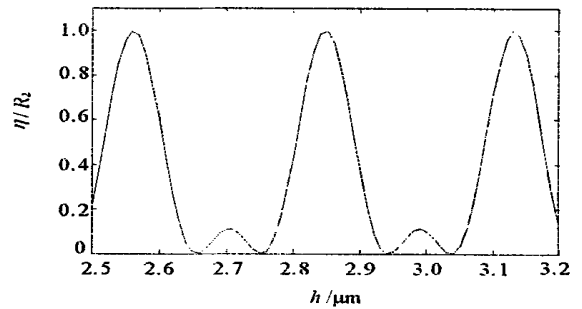


Fig. 5 3 light diffraction efficiency at 0-order vs trough depth of coating grating

图 5 镀膜光栅三倍频零级反射光衍射效率与光栅槽深的关系

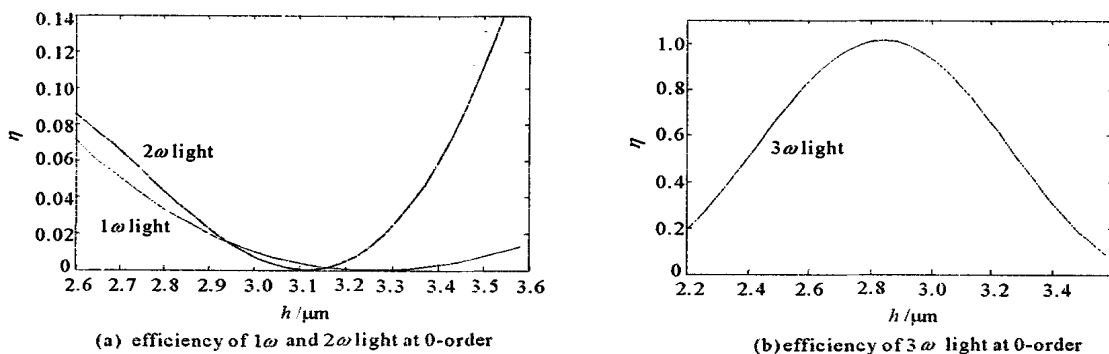


Fig. 6 Diffraction efficiency of CSG with AR overcoat

图 6 镀膜光栅对各波长激光的零级衍射效率

## 4 结 论

综上所述,对 CSG 光栅面镀膜是一种可行的技术方案,它不仅能明显降低 ICF 驱动器终端三倍频光的损耗,而且还便于工艺实现。并非所有的透射光栅表面镀膜都能起到良好的减反效果,本文详细分析了 CSG 光栅面镀膜的各种理论问题,给出了计算模拟结果,即未镀膜色分离光栅的三倍频光透过率受到光栅表面菲涅尔反射的影响,最大透过率不超过 96.8%,采用文中所述镀平面膜的方案,可以使光栅面反射几乎完全消除,在强激光传输应用中具有明显的比较优势。镀膜光栅刻槽深度的优化值为  $h = 2.84\mu\text{m}$ ,膜厚  $d_f$  为等效  $1/4$  波长,即  $d_f = 71.2\text{nm}$ 。

### 参考文献:

- [1] 粟敬钦,杜惊雷,姚军,等.实现惯性约束核聚变驱动器谐波分离的二元光学元件研究[J].光学学报,2000,20(3):405.(Su J Q, Du J L, Yao J, et al. Binary optical element for separating harmonic waves in ICF driver. *Acta Optica Sinica*, 2000, 20(3): 405.)
- [2] Loewen E G, Popov E. Diffraction gratings and applications[M]. Marcel Dekker, Inc, 1997.
- [3] 朱自强,王仕,苏显渝.现代光学教程[M].成都:四川大学出版社,1990.(Zhu Z Q, Wang S F, Shu X Y, et al. Modern optics[M]. Chengdu: Sichuan University Press, 1990)
- [4] 杨春林,张蓉竹,杨李茗,等. ICF 系统中全息透镜聚焦特性及衍射效率分析[J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(3):234. (Yang C L, Zhang R Z, Yang L M, et al. Focusing characteristics and diffraction efficiency of the holographic lens in ICF driver system[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, 15(3):234)
- [5] Moharam M G, Grann E B, Pommet D A. Formulation for stable and efficient implementation of the rigorous coupler-wave analysis of binary gratings[J]. *Journal of Optical Society of America*, 1995, 12(5):1068.
- [6] Peng S, Morris M G. Efficient implementation of rigorous coupled-wave analysis for surface-relief gratings[J]. *Journal of Optical Society of America*, 1995, 12(5):1087.
- [7] Li L F, Haggans C W. Convergence of the coupled-wave method for metallic lamellar diffraction gratings[J]. *Journal of Optical Society of America*, 1993, 10(6):1184.

## Study on the anti-reflection technology of color separate gratings

YANG Chun-lin, XU Qiao, YANG Li-ming, ZHOU Li-shu, ZHANG Qing-hua

(Chengdu Fine Optical Engineering Research Center, P. O. Box 450, Chengdu, 610041, China)

**Abstract:** Because of the reflection on the surface of the gratings, the diffractive efficiency of the components can't meet the requirement of the ICF system. To resolve the problem this paper introduces a kind of scheme adopted coating to reduce the reflection of the gratings' surface. The coating anti-reflection technology of the CSG is discussed in detail. Using the scalar theory the design parameters have been decided and the structure parameters of the gratings have been optimized. The optimized value of the trough depth of the CSG is  $2.84\mu\text{m}$ , and the optimized value of the film depth is  $71.2\text{nm}$ . The numerical results show that the reflection of the gratings' surface has been eliminated drastically. The validity of the anti-reflection technology is distinctly in the application of the high power laser propagation.

**Key words:** Color separate grating (CSG); Diffractive efficiency; Sol-gel film; Coating anti-reflection technology.