

用耦合波法分析平面镀膜分频光栅的特性

杨春林 许 乔 周礼书 杨李茗

(成都精密光学工程研究中心, 成都 610041)

摘要 使用严格的耦合波理论分析了 ICF 系统的色分离光栅 (CSG) 特性, 特别针对平面镀膜减反后的情况进行了详细的讨论. 模拟计算结果表明, 与未镀膜的裸光栅相比, 采用文中所述方法设计的镀膜光栅有很好的减反增透效果, 具有良好的应用前景.

关键词 耦合波; 色分离光栅; 平面膜; 减反射

中图分类号 O437.4 **文献标识码** A

0 引言

在激光惯性约束核聚变领域, 需要通过倍频晶体把波长为 $1.06 \mu\text{m}$ 的激光经三倍频转换为 $0.35 \mu\text{m}$ 的激光, 再将有用的 $0.35 \mu\text{m}$ 三倍频光从 $1.06 \mu\text{m}$ 基频、 $0.53 \mu\text{m}$ 二倍频光中分离出来, 这就是谐波分离技术. 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衍射, 这对提高光栅的能量利用率, 达到惯性约束核聚变对 CSG 光栅的苛刻要求是很不利的. 本文提出一种新的方案, 即通过在光栅表面的镀平面膜减反, 从而获得优良性质的 CSG 光栅.

1 镀膜减反的方案

ICF 系统中的 CSG 通常被设计为一个三台阶结构, 三台阶对三倍频光的相位延迟分别为 $0, 2\pi, 4\pi$, 三倍频光直线通过, 由于波长不同, 基频光和二倍频光将被衍射到两边. CSG 的各台阶宽度相同, 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, 我们取 $T = 30 \mu\text{m}$, 这样, 对基频光的分离角 (一级衍射) 为 2.01° , 对二倍频光的分离角为 1.01° , 但是裸光栅表面存在菲涅耳反射, 因此光的透过率小于 1; 从而影响了三倍频光的利用率. 我们期望通过在光栅表面镀增透膜, 以便减小其菲涅耳反射.

相对于裸光栅, 对光栅镀膜有两种方案^[1], 即仿形膜和平面膜, 如图 1 所示.

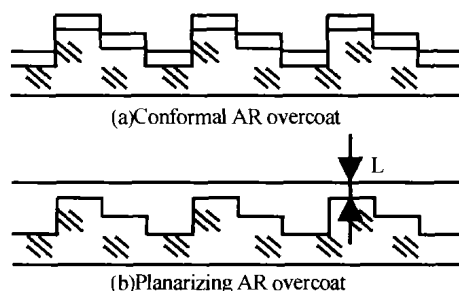


图 1 光栅表面镀膜示意

Fig. 1 CSG with AR overcoat

镀仿形膜的方案复杂, 工艺上难以保证膜的形状与裸光栅一致, 所以本文只讨论镀平面膜. 这种平面膜消反射的原理是, 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 $\lambda/2$ 而干涉相消, 从而减小或消除光栅的反射损耗. 参见图 2.

考虑平行光垂直入射或小角度入射的情况. 空气-膜界面和膜-石英界面都会产生反光, 从远场的角度来看, 前者产生反射平行光, 后者是光栅面, 它产生一系列反射光, 只有当光栅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.

由于介质膜中的光传输的精确求解依赖电磁边值问题, 镀膜减反色分离光栅的刻槽深度也较大, 因此, 有必要根据严格电磁理论, 并结合耦合波法求解镀膜减反色分离光栅. 膜折射率、光栅深度和介质色散等多个参数影响减反效果和光栅特性. 限于篇幅, 文章仅讨论在给定多数参数的情况下, 分别求解膜层厚度和光栅槽深的最优值的问题, 同时也证明了方案的可行性.

2 镀膜光栅的电磁理论

镀膜减反色分离光栅的结构示意如图 2 所示. 在相对介电系数为 ϵ_3 的石英光栅基底上镀制一层相对介电系数为 ϵ_2 的 sol-gel 膜, 它与空气的界面面

为平面. 为方便分析计算,把镀膜减反色分离光栅分为五个部分,即空气层为 I 区,膜层为 II 区,光栅层分为 III 区和 IV 区,石英基底为 V 区. 图中还标出了 X-Z 长度坐标系.

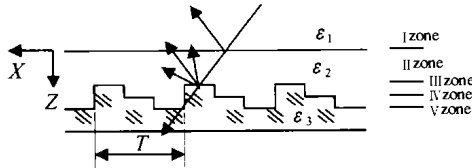


图2 镀膜减反色分离光栅的结构示意图
Fig. 2 Structure of AR Coated CSG

利用耦合波法分析光栅区 III 区的电磁场:

考虑 TE 波入射,并根据光栅区 III 的电磁场分布满足波动方程: $\nabla^2 E + k^2 \epsilon(x) E = 0$

在可以展开 E 和 ϵ 的情况下,利用常见的耦合波方程可得方程的解

$$E = \sum_m S_m(z) \exp [j(k_{xm}x + k_z z)];$$

$$S_m = \sum_{n=1}^{2 \cdot SMAX} C_n \omega_{m,n} \exp (\lambda_n z) \quad (1)$$

式中 $m = 1, 2, \dots, SMAX$. 光栅区 IV 区的电磁场也可以类似的表示为

$$E = \sum_m \bar{S}_m(z) \exp [j(k_{xm}x + \bar{k}_z z)];$$

$$\bar{S}_m = \sum_{n=1}^{2 \cdot SMAX} \bar{C}_n \omega_{m,n} \exp (\bar{\lambda}_n z) \quad (2)$$

膜层 II 区的光场可以写为

$$E_{y2} = \sum_m U_m \exp [j(k_{xm}x - k_{zm}z)] + \sum_m V_m \exp [j(k_{xm}x + k_{zm}z)] \quad (3)$$

式中 λ_n 和 $\omega_{m,n}$ 为已知量; C_n 是由边界条件确定的待定量; $SMAX$ 表示计算衍射级的总数.

其中 $k_{zm} = [k_0^2 \epsilon_2 - k_{xm}^2]^{1/2}$. 从式中可以看出, U_m, V_m 的物理意义是表示在膜层 II 区中折返传输的各级衍射光振幅.

3 边界条件

如图 2, I 区是入射区,归一化入射电场可以展开表示为

$$E_{y1} = \exp [j(k_{x0}x + k_{z0}z)] + \sum_m R_m \exp [j(k_{xm}x - k_{z1m}z)] \quad (4)$$

V 区是出射区,电场表示为

$$E_{y5} = \sum_{m=1}^{SMAX} T_m \exp [j(k_{xm}x + k_{z5m}(z - L_3))] \quad (5)$$

式中, $k_{z1m} = [k_0^2 \epsilon_1 - k_{xm}^2]^{1/2}$; $k_{z5m} = [k_0^2 \epsilon_3 - k_{xm}^2]^{1/2}$; L_3 是 IV、V 区交界面的长度坐标值.

II 区、III 区和 IV 区的电场表示可见前一节.

对各界面,都有电磁场切向分量连续,所以,在 I、II 边界上, $z = 0$, 带入前面的公式,可得

$$A \begin{pmatrix} \delta_{m0} \\ R_m \end{pmatrix} = B \begin{pmatrix} U_m \\ V_m \end{pmatrix}; \text{其中 } A = \begin{pmatrix} I & I \\ jk_{z1m} & -jk_{z1m} \end{pmatrix};$$

$$B = \begin{pmatrix} I & I \\ -jk_{z2m} & jk_{z2m} \end{pmatrix}$$

式中 A, B 都是分块系数矩阵, I 是单位阵, jk_{z1m}, jk_{z2m} 表示 $m \in [1, SMAX], n \in [1, 2 \times SMAX]$ 对角阵. 并且,以下同.

类似的,在 II、III 边界上, $z = L$, 可得

$$D \begin{pmatrix} U_m \\ V_m \end{pmatrix} = E [C_n]$$

在 III、IV 边界上, $z = L_2$, 可得

$$F [C_n] = G [\bar{C}_n]$$

在 IV、V 边界上, $z = L_3$, 可得

$$H [\bar{C}_n] = X \begin{pmatrix} T_m \\ 0 \end{pmatrix}$$

上面公式中的 DEFGHX 矩阵都是相应的系数矩阵. 利用变量替换,最后得到

$$X^{-1} H G^{-1} F E^{-1} D B^{-1} A \begin{pmatrix} \delta_{m0} \\ R_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_m \\ 0 \end{pmatrix} \quad (6)$$

这是一个关于 R_m 和 T_m 的恰定的线性方程组. 从中可以算出 R_m 和 T_m .

各级衍射光的衍射效率可以通过下面的公式进行计算

对 m 级透射光

$$\eta_{Tm} = \text{real}(k_{z5m}/k_{z0}) T_m T_m^* \quad (7)$$

对 m 级反射光

$$\eta_{Rm} = \text{real}(k_{z1m}/k_{z0}) R_m R_m^* \quad (8)$$

4 计算结果与分析讨论

计算采用的参数为:光栅各台阶的宽度和深度相等;台阶宽度 $10 \mu\text{m}$; sol-gel 膜对各波长折射率 1.233, 石英对各波长的折射率, $n_{0.35} = 1.48; n_{0.53} = 1.46; n_{1.06} = 1.45$; 光束垂直入射.

计算得到透过的三倍频零级衍射光衍射效率与所取的衍射级数的关系,见图 3. 当衍射级次取 ± 3 时,计算得到的三倍频光零级透过率约为 76%, 随着衍射级次取得更多,超过 ± 40 个衍射级后,计算结果逐渐收敛于 96%. 这个结果与理想情况(即透

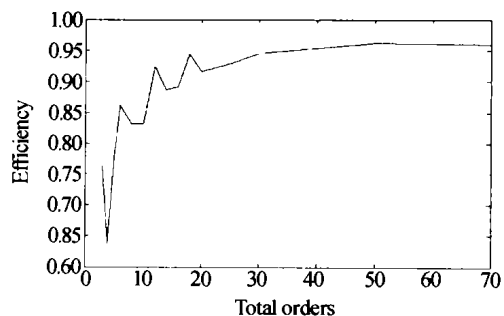


图3 计算的收敛性
Fig. 3 Convergence of the calculation

过率为 1) 或标量法的计算结果相比相差大约 4%。我们认为其原因是, 由于 CSG 光栅是一种长周期的光栅, 有很多行波衍射级, 因此采用耦合波法计算也需要引入相当多的级次, 从而对截断误差和舍入误差都有较大影响。我们的结果与文献[2]、[3]也是一致的。

膜厚对衍射效率的影响见图 4, 从图中可以看出膜厚 71.2 nm 时减反效果最好, 透过光的零级衍射效率最高, 总反射率也非常低, 最低大约只有 0.1%。图(4)中膜厚 $thickness = L$ 。

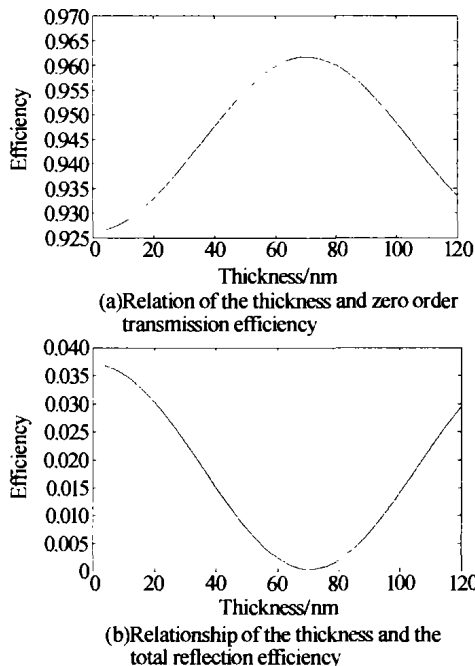


图 4 膜厚的影响
Fig. 4 The Effect of Thickness of the AR Overcoat

图 5(a) 表示光栅台阶深度对三倍频光的透过率的影响。其中虚线表示的是未镀膜裸光栅的衍射效率随台阶深度变化的函数曲线, 实线表示的是镀膜光栅的衍射效率随台阶深度变化的函数曲线。从图中可以看出: 由于膜材料填充的影响, 平面镀膜光栅的台阶深度比未镀膜情况深大约一倍。其衍射效率最高值出现在台阶深 $1.47 \mu\text{m}$, 衍射效率约为 96.2%, 未镀膜光栅衍射效率最高值出现在台阶深 $0.73 \mu\text{m}$, 衍射效率约为 93.4%。这就是说, 在其他条件相同的情况下, 镀膜光栅的零级透过率提高了大约 3 个百分点。

图 5(b) 表示光栅台阶深度对基频光和二倍频光的透过率的影响。其中虚线表示二倍频光的零级衍射效率, 实线表示基频光的衍射效率。在台阶深度为 $1.47 \mu\text{m}$ 时, 他们的零级衍射效率大约为 4%。图(5)中光栅台阶深度 $depth = L_2 - L$ 。

综上所述, 平面镀膜光栅的衍射效率比未镀膜情况提高了大约 3%。光栅的优化结构参数为 $L =$

$71.2 \text{ nm}; L_2 = 1.54 \mu\text{m}; L_3 = 2.91 \mu\text{m}$ 。

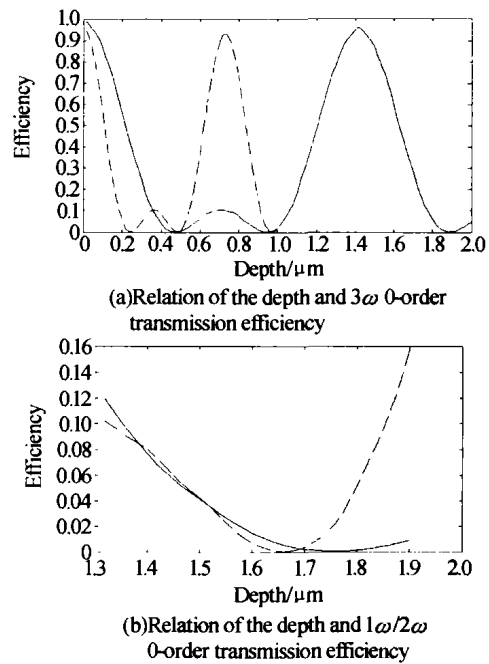


图 5 光栅台阶深度的影响
Fig. 5 The Effect of the gratings step depth

5 结论

本文提出了一种降低光栅表面反射损耗的新方法, 即在光栅表面加镀一层减反膜, 考虑到光栅面形给镀膜带来的困难, 提出了将膜层设计为一个平面的方案。这种镀膜方案降低了镀膜的加工难度, 同时还能获得很好的性能。文章使用耦合波法详细分析了镀膜前后光栅衍射效率的变化, 并且讨论了膜层厚度以及光栅台阶深度对光栅衍射效率的影响, 数值模拟的结果表明平面镀膜光栅的衍射效率比未镀膜情况提高了大约 3%, 这个结论证实了文中提出方案的可行性和有效性。

参考文献

- 1 Britten J A, Herman S M, Summers L J, et al. Manufacture, optical performance and laser damage characteristics of diffractive optics for the national ignition facility, *SPIE*, 1998, **3578**:337 ~ 346
- 2 陈德伟, 王炜, 李永平. 用于 ICF 的分频光栅的耦合波分析. *光子学报*, 2002, **31**(4):433 ~ 437
Chen D W, Wang W, Li Y P. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(4):433 ~ 437
- 3 Song Peng, Morrie G M. Efficient implementation of rigorous coupled-wave analysis for surface-relief gratings. *JOSA*, 1995, **12**(5):1087 ~ 1096
- 4 姜永远, 侯春风, 李焱, 等. 光折变相位栅衍射动态特性的严格耦合波分析. *光子学报*, 2000, **29**(3):216 ~ 222
Jang Y Y, Hou C F, Li Y, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2000, **29**(3):216 ~ 222

Coupled-wave Analysis of Color Separation Grating with Planarizing AR coating

Yang Chunlin, Xu Qiao, Zhou Lishu, Yang Liming

Chengdu Fine Optical Engineering Research Center, Chengdu 610041

Received date: 2003-06-23

Abstract The characteristics of the CSG, which is employed in the ICF system, have been analyzed by using the coupled-wave theory. Specially, the anti-reflection characteristic of the CSG with planarizing AR coating has been discussed in detail. The numerical results show that the anti-reflection effect of this kind of coating gratings is remarkable.

Keywords Coupled-wave; CSG; Planarizing AR coating; Anti-reflection

Yang Chunlin was born in June 1972, got his M. E. degree from the Department of Optoelectronics, Sichuan University, in June 2000. His researches focus on the diffraction optics and optical electronics.

