

文章编号: 1001-4322(2007)01-0075-04

取样光栅镀膜减反技术研究*

刘 全, 吴建宏

(苏州大学 信息光学工程研究所, 江苏 苏州 215006)

摘 要: 根据惯性约束聚变系统技术要求,提出了镀膜减反方案,以解决现有光栅由于元件表面反射影响零级透射率的问题。使用严格耦合波理论分析了镀 sol-gel 减反膜的取样光栅特性,详细地分析了仿形膜和平面膜的减反情况和取样效率的变化。结果发现,镀平面膜是一种可行的技术方案,光栅表面反射几乎完全消除,表明可以通过取样光栅镀膜减反来达到提高透射率的目的;裸光栅的深度为 12 nm 时,平面减反膜厚为 60 nm,即光学厚度为等效 1/4 波长;72 nm。此时的透射率为 99.8%,取样效率为 0.241%。

关键词: 取样光栅; 减反膜; 衍射效率; 严格耦合波理论

中图分类号: O436.1; O484

文献标识码: A

在惯性约束聚变(ICF)系统的终端靶场子系统中,在三倍频激光(351 nm)进入终端靶场之前,需要采用取样光栅(BSG)将透射的三倍频光按一定的比例送入能量计中进行能量诊断。取样光栅是适用于整个波长范围的取样元件,它可应用于大口径光束的取样,在基本不影响主光束的前提下,为激光能量、波前畸变的诊断提供取样光束。为了保证主光束打靶的强能量,取样光束的取样效率一般在 1%左右^[1-3]。

目前,国内已有的报道 BSG 的文献中,都没有考虑消除光栅表面的反射,这对提高 ICF 系统的能量利用率及靶场性能是很不利的。为了更好地利用三倍频光的能量,在熔石英基片的光栅面上镀一层溶胶-凝胶(sol-gel)减反膜,使得透过光栅的零级衍射光具有入射光能量的 98.5%~99.5%,从而更好地保证了主光路打靶时的强能量。为此,我们进行了在取样光栅表面镀膜减反的研究。

1 取样光栅的设计原理

取样光栅是一种相位型的变周期光栅,这种光栅结构能使取样光束从主光路中分离出来并聚焦,如图 1 所示。它的变周期光栅结构,与离轴菲涅尔波带板结构相同,可以由一束发散球面波和一束会聚球面波或者一束球面波和一束平面波相干涉来得到。

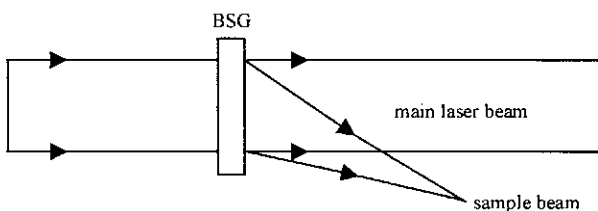


Fig. 1 Sampling principle of BSG

图 1 BSG 取样原理示意图

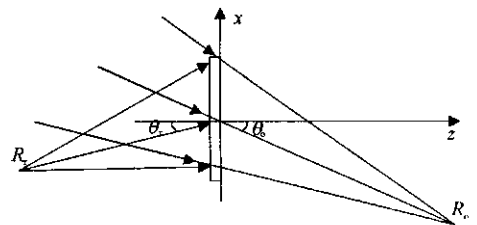


Fig. 2 Achromatic optical system

图 2 消像差光路

制作取样光栅的方法如下:首先是用全息干涉曝光的方法在光致抗蚀剂(光刻胶)上形成所需的全息光栅掩模;然后通过离子束刻蚀的方法将掩模图案转移到熔石英基片上。其中第一步形成所需的全息光栅掩模是最关键的一步,它的好坏直接影响着后续步骤的进行。根据 ICF 试验要求,结合三级像差理论,我们设计了消彗差和像散的消像差记录光路^[3],如图 2 所示。同时取样光栅是一种衍射光学元件,即是一种衍射光栅。衍射光栅最重要的指标之一是衍射效率,故需利用严格耦合波理论对其衍射效率问题进行深入地研究^[3],由于该光栅是变周期结构,故首先分析了衍射效率与空间频率变化之间的关系;其次,由于在同一光栅面积上不同区域的槽宽比或曝光量不同,在显影过程中难免出现占宽比不一致的情况,这一情况将导致光栅面上的衍射效率不均匀;最后,由于离子刻蚀的不均匀性会带来刻蚀深度的不均匀,这一不均匀也将影响衍射效率的不均匀。

* 收稿日期:2006-05-16; 修订日期:2006-07-21

基金项目:国家 863 计划项目资助课题;苏州大学青年教师研究基金资助课题(Q3210525)

作者简介:刘 全(1978—),男,安徽滁州人,研究实习员,硕士,主要从事衍射光学和微细加工技术的研究;liuquan@suda.edu.cn。

通过理论上的计算可以发现,在占宽比和槽深这两个光栅结构参量中,槽深的变化对衍射效率更敏感。

2 取样光栅镀膜减反技术原理

裸光栅表面存在菲涅耳反射,因此光的透射率 $T < 1$,这就影响了三倍频光的利用率。我们期望能够通过光栅表面镀减反膜,从而减小三倍频光的反射能量损失。

对光栅镀膜有两种方案,即仿形膜和平面膜,如图 3 所示, n_1 是空气的折射率, n_2 是减反膜的折射率, n_3 是石英基底的折射率, d_1 是仿形膜的厚度, f_1 是其占宽比, d_p 是平的一层膜的厚度, d 和 f 是裸取样光栅的结构参数(即高度和占宽比 $f = a/\Lambda$)。由文献[1]可知,裸取样光栅的深度 d 一般在几十 nm;同时根据薄膜光学的基本结论^[4],完善的单层减反膜的条件是:膜层的光学厚度为 $1/4$ 波长,其折射率为基片和入射媒质折射率相乘积的平方根。这里基片熔石英的折射率在 351 nm 入射光下是 1.471 5,入射媒质是空气,其折射率是 1,故最理想的单层膜的折射率应是 1.213。还考虑到入射的强激光,所以这里选用的减反膜是具有高损伤阈值的 sol-gel 膜,在 351 nm 入射光下其折射率是 1.22,故单层 sol-gel 膜的厚度应是 72 nm。即在仿形膜情况下: $d_p + d = 72$ nm, $d_1 = d$, $f_1 = f$;在平面膜情况下: $d_p + d = 72$ nm。

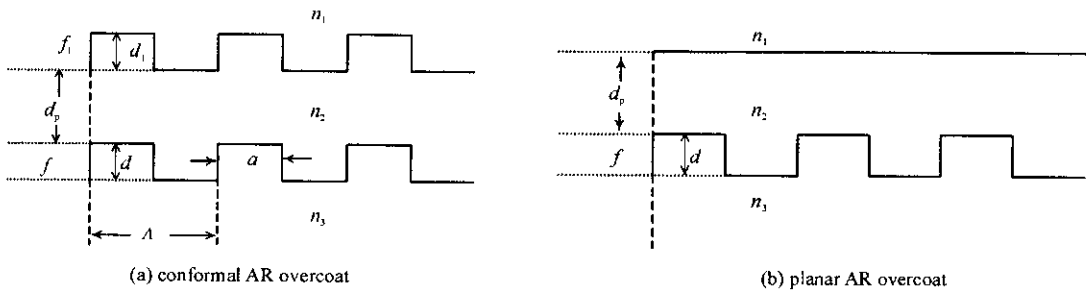


Fig. 3 Structure of the anti-reflective film on the BSG

图 3 光栅表面镀膜示意图

根据严格耦合波理论^[5-8],我们对以上的两种镀膜方案进行了数值模拟,并与未镀膜情况下的光栅的衍射效率进行了对比分析。镀膜前的光栅假设为在文献[1]中分析好的结构,即空频是 568(1/mm),占宽比为 0.5,槽深是 12 nm 的矩形光栅。此时的零级透射光的效率是 96.1%,取样效率(即一级透射光衍射效率)为 1.019%。

2.1 仿形膜

根据严格耦合波理论的基本思想,我们建立了分析镀膜后的光栅衍射效率的程序,即在分层处理的时候,我们把中间一层认为是周期无穷大的周期结构,其他的仍然是标准的周期结构。对于 sol-gel 膜,其光学厚度为 72 nm = $d_p + d$,因为 $d = 12$ nm,所以 $d_p = 60$ nm,且 $d_1 = d$, $f_1 = f = 0.5$ 。由这些结构参数,计算了此种结构下的衍射效率和 d_p 的关系;并与单纯地认为无光栅结构基底下,使用薄膜光学的理论公式计算了透射率和膜厚的关系的结果进行了对比,如图 4 所示。其一级衍射效率和膜厚的关系如图 5 所示。

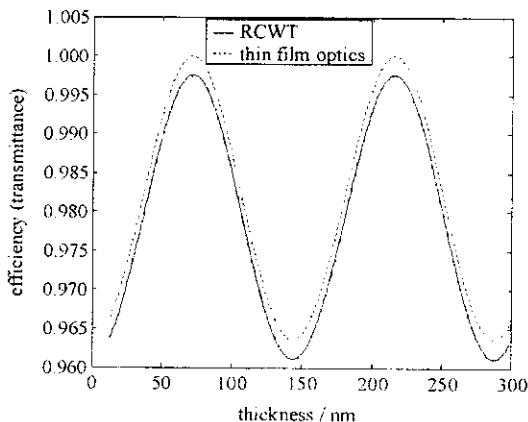


Fig. 4 Effect of thickness of the AR overcoat

图 4 膜厚的变化对衍射效率和透射率的影响

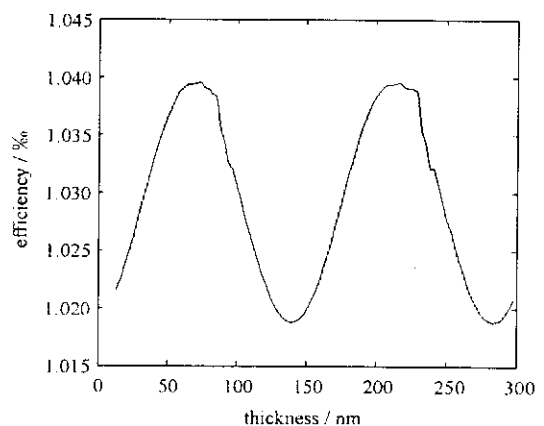


Fig. 5 First order diffraction efficiency vs

thickness of the conformal AR overcoat

图 5 一级衍射效率和仿形膜厚的关系

从图 4 可以看出,峰值的位置基本上都是在 72 nm 附近,再考虑到光栅还有其它的衍射级次,故零级衍射效率的值小于相应处的透射率,这时零级透射光的效率由 96.1% 上升到了 99.5%。从图 5 也可以看出,在膜厚为 72 nm 附近,一级衍射效率也取最大值,但是其整个的变化范围是比较小的,与没有镀膜时的衍射效率 1.019% 相比,几乎可以认为没有什么大的变化。

2.2 平面膜

对于平面膜情况,其结构参数中, d 与 f 仍保持不变, $d=12$ nm, $f=0.5$ 。仍然使用 sol-gel 膜,计算了此种结构下的零级衍射效率和 d_p 的关系,如图 6 所示。其一级衍射效率和 d_p 的关系如图 7 所示。

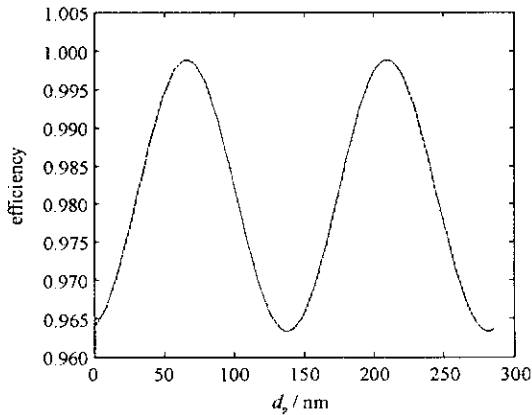


Fig. 6 Zero order diffraction efficiency vs thickness of the planar AR overcoat

图 6 零级衍射效率和平面膜厚的关系

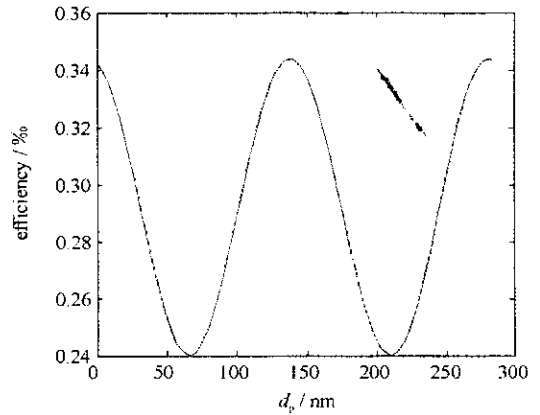


Fig. 7 First order diffraction efficiency vs thickness of the planar AR overcoat

图 7 一级衍射效率和平面膜厚的关系

从图 6 可以看出,峰值的位置基本上是在 60 nm 附近,再考虑到光栅还有其它的衍射级次,故零级衍射效率的值必然是要小于 1 的,这时零级透射光的效率由 96.1% 上升到了 99.8%,即在平面膜情况下,零级透射光的效率与仿形膜情况下是相似的。但从图 7 可以明显看出,在 d_p 为 60 nm 附近,一级衍射效率取最小值,与图 5 的情况正好相反;与没有镀膜时的衍射效率 1.019% 相比,此时的一级衍射效率才是 0.241%。

以上的结论,对于取样光栅的使用是更加的有利。当镀上了光学厚度为 $1/4$ 波长的减反膜后,能量的反射损失大大地减小了,对于透射零级光而言,它的光能是更加的强了,而对于透射一级衍射光,其衍射效率要低的很多。由此,在实际的制作中,对于浅槽的要求也可稍微放宽一点,即在离子刻蚀时,可以稍微刻蚀深一点。

3 结 论

在实际的镀膜条件下,很难将光栅的结构重现在薄膜上,而且,这里的光栅的槽深本身就很浅。以及根据对二种镀膜模型的分析,我们认为平面膜在实际镀膜中是切实可行的,当镀上了光学厚度为 $1/4$ 波长的减反膜(sol-gel)后,即膜厚为 72 nm 附近时($d=12$ nm, $d_p=60$ nm 左右),其能量的利用率更高(99.8%),而且相应的一级衍射效率更低,只有 0.241%。这样可以更有效地利用能量,更好地保护取样光束探测器。

综上所述,对取样光栅镀平面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(351 nm)的损耗,而且还便于工艺实现。未镀膜取样光栅的透过率受到光栅表面菲涅尔反射的影响,最大透过率在 96.1% 左右,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。裸光栅的深度 d 是 12 nm 时,平面减反膜厚 d_p 为 60 nm,即光学厚度为 $1/4$ 波长: $d+d_p=72$ nm。此时的取样效率为 0.241%。

参考文献:

- [1] 刘全, 吴建宏, 李朝明. 取样光栅的设计及衍射行为研究[J]. 激光技术, 2005, 29(4):398-400. (Liu Q, Wu J H, Li C M. Design of BSG and study on its diffraction action. *Laser Technology*, 2005, 29(4):398-400)
- [2] 高福华, 曾阳素, 谢世伟, 等. 电子束直写制作低效取样光栅[J]. 中国激光, 2003, 30(2):134-136. (Gao F H, Zeng Y S, Xie S W, et al. Using e-beam direct writing method to fabricate low-efficiency beam sampling grating. *Chinese Journal of Lasers*, 2003, 30(2):134-136)
- [3] Liu Q, Wu J H, Li C M. Design of beam sampling grating and study on its diffraction action[C]//Proc of SPIE. 2006; 60273C.
- [4] Macleod H A. Thin-film optical filters[M]. London: Adam Hilger Ltd, 1969; 54-55.
- [5] 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. (Liu Q, Wu J H. Analysis and compari-

son of the scalar diffraction theory and coupled-wave theory about grating. *Laser Journals*, 2004, **25**(2):31-34)

- [6] 柴立群, 杨李茗, 许乔. 用于 ICF 驱动器的取样光栅的矢量分析与计算[J]. *强激光与粒子束*, 2002, **14**(2):270-274. (Chai L Q, Yang L M, Xu Q. Vector theory analysis and numerical calculation for beam sampling grating used in ICF. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, **14**(2):270-274)
- [7] Moharam M G, Gaylord T K. Diffraction analysis of dielectric surface-relief gratings[J]. *J Opt Soc Am*, 1982, **72**(10):1385-1392.
- [8] Moharam M G, Grann E B, Pommet D A, et al. Formulation for stable and efficient implementation of the rigorous coupled-wave analysis of binary gratings[J]. *J Opt Soc Am A*, 1995, **12**(5):1068-1076.

Anti-reflection technology for beam sampling grating

LIU Quan, WU Jian-hong

(*Institute of Information Optical Engineering, Soochow University, Suzhou 215006, China*)

Abstract: Because of the reflection on the surface of the gratings, the transmittance of the components can not meet the requirement of the inertial confinement fusion(ICF) system. To resolve the problem, this paper introduces a kind of scheme adopting coating to reduce the reflection of the gratings' surface. The characteristics of beam sampling grating(BSG) with anti-reflection sol-gel coating are analyzed using the rigorous coupled-wave theory. The anti-reflection characteristics of the BSG with conformal anti-reflective(AR) coating and planar AR coating are discussed in detail. The results show that the planar AR coating eliminates the reflection of the gratings' surface drastically. The validity of the anti-reflection technology is distinct in the application in the high power laser propagation. The groove depth of the bare BSG is 12 nm, and the optimized value of the film depth is 60 nm. And the total depth is equivalent to quarter wavelength; 72 nm. The transmittance of the BSG is 99.8%; the sampling efficiency is 0.241%.

Key words: Beam sampling grating; Anti-reflective coatings; Diffraction efficiency; Rigorous coupled-wave theory