

文章编号: 1001-4322(2003)09-0859-04

# 氧碘激光腔内 45° 入射高反射镜的膜系设计\*

李刚, 高劲松, 孙连春

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130022)

**摘要:** 从膜层内的驻波场分布和对膜系的相移要求出发, 利用倍频的设计思想对氧碘激光腔内 45° 入射高反射镜进行优化设计, 得出了满足对 632.8nm 和 1315nm 双波长高反射, 同时在 1315nm 处有 180 位相延迟的新膜系结构, 与传统的设计膜系相比, 此膜系大大降低了高折射率层的厚度, 薄膜性能有望得到进一步提高。

**关键词:** 高反射镜; 倍频设计; 位相延迟; 场强分布

**中图分类号:** TN248.5

**文献标识码:** A

随着激光器输出功率和能量的不断提高, 对激光器腔镜反射膜的反射率和损伤阈值要求也越来越高。激光薄膜在高能激光器的发展中已处于“瓶颈”地位, 受到国内外人士的高度重视。目前国际上 1315nm 高反射镜的反射率已达 99.9% 以上。在国内, 1315nm 处 0° 入射的高反射镜的反射率超过 99.9%, 损耗可降到万分之二以下, 45° 入射的高反射镜反射率仅稳定在 99.8%, 且膜层的损伤阈值及牢固度等性能相对较差<sup>[1]</sup>。

因此, 在氧碘激光系统中 45° 入射高反射镜仍然是一个薄弱环节, 这是由于: (1) 45° 入射时, S, P 分量明显分开:  $R_S$  提高,  $R_P$  降低, 使得平均反射率  $R$  下降。(2) 在反射率下降的同时, S, P 分量的反射相移  $\delta_S$  和  $\delta_P$  不等, 因此会产生一定的位相延迟  $\delta = \delta_S - \delta_P$ , 从而影响到输出激光的偏振状态。(3) 为了尽可能提高 45° 入射高反射镜的反射率, 镀膜层数要增加较多, 从而导致损耗增加, 应力匹配不佳, 膜层往往龟裂, 甚至脱落。(4) 膜层厚度的增加, 尤其是高折射率层厚度的增加, 导致膜层内节瘤缺陷的增长, 使得膜层的吸收和散射损耗增加, 膜层的损伤阈值降低。

所以提高 45° 入射高反射镜的反射率和损伤阈值显得尤为必要。而随着高能氧碘激光器的不断发展, 传统的膜系设计已不能满足要求。本文从膜层内的驻波场分布和对膜系的位相要求出发, 利用倍频的设计思想设计出了新的膜系结构, 与传统的膜系相比, 此膜系大大降低了高折射率膜层的厚度, 膜层的性能包括吸收、散射、损伤阈值等有望得到极大提高。

## 1 膜系设计

现用化学氧碘激光器 (COIL) 对腔内 45° 入射高反射镜的性能要求如下: 1315nm 和 632.8nm 双波长高反射, 其中  $R_{1315nm} > 99.9\%$ ,  $R_{632.8nm} > 99.5\%$ , 对 1315nm 的耐激光损伤阈值为  $50\text{kW}/\text{cm}^2$ , 同时要求在 1315nm 处有 180 位相延迟。

COIL 腔镜采用全介膜系, 由高低折射率材料交替叠加而成。常规使用的高折射率材料为  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ ,  $\text{HfO}_2$  等, 综合各种材料的优缺点及制备难易程度, 在此我们采用的高折射率材料为  $\text{ZrO}_2$ , 设其折射率为 2.05, 低折射率材料为  $\text{SiO}_2$ , 设其折射率为 1.45, 基底为单晶硅, 设其折射率为 3.4, 在此均没有考虑材料的吸收。

### 1.1 传统的膜系设计方法即两个反射板相叠加

传统的膜系设计是采用两个反射板叠加的方法, 膜系结构<sup>[2]</sup>为

$$\text{SUB}/632.8(\text{LH})^7/1315(\text{LH})^{20}/\text{A}$$

其中 SUB 代表基底, L 代表低折射率材料  $\text{SiO}_2$ , H 代表高折射率材料  $\text{ZrO}_2$ , A 为空气。  $\text{SiO}_2$  层的总厚度为 5549.31nm,  $\text{ZrO}_2$  层的总厚度为 3650.82nm, 膜层总厚度为 9200.13nm。膜系的光谱曲线如图 1 所示, 在 1315nm 处的反射率为 99.9861%。此膜系的位相延迟随波长的变化如图 2 所示, 从图中可以看出膜系在 1315nm 处的位相延迟恰为 180°, 满足要求。

\* 收稿日期: 2003-02-20; 修订日期: 2003-05-06

基金项目: 国家 863 计划项目资助课题

作者简介: 李刚 (1977-), 男, 山东淄博人, 博士研究生, 研究方向为薄膜光学; E-mail: ligciomp@yahoo.com.cn.

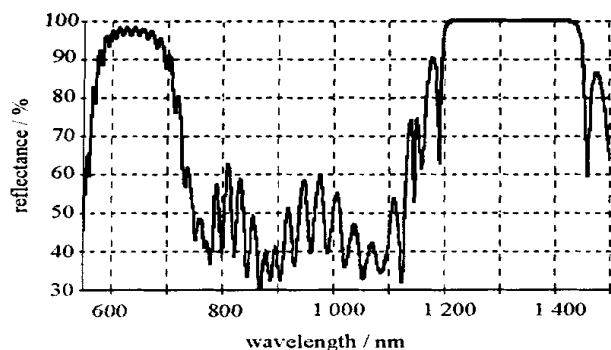


Fig. 1 Theoretical reflectance curve at 45° incidence for the SUB/632.8(LH)<sup>M</sup> 1 315(LH)<sup>N</sup>/A 1m stack

图1 45°入射时膜系 SUB/632.8(LH)<sup>M</sup> 1 315(LH)<sup>N</sup> 的理论反射率曲线

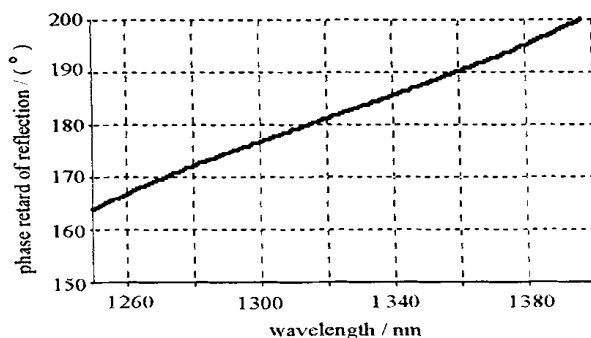


Fig. 2 Theoretical phase retard curve at 45° incidence for the SUB/632.8(LH)<sup>M</sup> 1 315(LH)<sup>N</sup>/A film stack

图2 45°入射时高反射膜系 SUB/632.8(LH)<sup>M</sup> 1 315(LH)<sup>N</sup> 的理论反射位相延迟曲线

## 1.2 倍频的设计方法

从理论上讲,只要不断增加传统设计膜系的膜层层数,即可望得到足够接近 100% 的反射率。但实际上膜层的层数不能无限的增加,最高可达到的反射率要受到膜层吸收和散射损耗的限制。目前认为膜层的损伤、吸收和散射损耗主要是由于高折射率层而导致的节瘤缺陷而引起的,随着高折射率介质层厚度的增加,膜层的损伤阈值单调下降。因此为提高膜层的损伤阈值,在膜系设计时就要尽量减少高折射率层的厚度<sup>[3]</sup>。传统的设计膜系已逐渐不能满足实际要求,这就要求我们研究新的膜系,以满足新的要求。为此,我们采用倍频的设计方法对氧碘激光腔内 45° 入射高反射镜进行设计,并得到了新的膜系结构。

### 1.2.1 倍频反射膜的基本理论<sup>[4]</sup>

倍频反射膜就是在  $f$  (基频波长) 和  $f/2, f/3, \dots, f/k$  ( $k$  为大于 1 的正整数) 处同时获得高反射的膜层。一般的反射膜系不能满足这个要求。由薄膜光学的矩阵理论可知,多层膜的特征矩阵为:  $\mu = M^s$ 。式中  $s$  为多层介质膜的基本周期,  $M$  为基本周期的特征矩阵,写成:  $\begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix}$ , 则高反射带必须满足的条件为

$$\left| \frac{M_{11} + M_{22}}{2} \right| = 1 \quad (1)$$

R. W. Smith 用高低折射率组成的两层膜为一个基本周期,并且满足

$$n_H d_H + n_L d_L = f/2, \quad n_H d_H = f/2, \quad n_L d_L = (1 - \dots) f/2 \quad (2)$$

由以上公式可以推导出

$$\left| \cos k \cos k (1 - \dots) - \frac{1}{2} \left( \frac{n_H}{n_L} + \frac{n_L}{n_H} \right) \sin k \sin k (1 - \dots) \right| = 1 \quad (3)$$

令  $\frac{1}{2} \left( \frac{n_H}{n_L} + \frac{n_L}{n_H} \right) = 1 + \dots$ ,  $0 < \dots < 1$ , 且因为  $k$  为正整数,由(3)式可以进一步得出

$$|\cos k (1 + \sin^2 k \dots)| = 1 \quad (4)$$

从(4)式可以看出,如果基本周期的光学厚度为  $f/2$ ,对给定的  $k$  值,只需适当选择  $\dots$  值,满足(4)式条件,便可在基频和各倍频处同时获得高反射带。

基于以上分析,便可通过改变高低折射率材料的厚度比来确定  $\dots$  的值,进行膜系设计。

### 1.2.2 倍频膜系的设计结果

利用倍频膜系的设计思想,对 1 315nm 处 45° 入射高反射膜进行设计,得到了一新的膜系结构,其 SiO<sub>2</sub> 层的总厚度为 7066.44nm, ZrO<sub>2</sub> 层的总厚度为 2 096.57nm,膜层总厚度为 9 163.01nm,与传统的膜系相比,膜层总厚度基本保持不变,但 ZrO<sub>2</sub> 层的厚度降低了 1 554.25nm。此膜系的反射光谱曲线如图 3 所示,在 1 315nm 处的理论反射率为 99.987 5%。此膜系的位相延迟随波长的变化如图 4 所示,在 1 315nm 处的反射位相延迟为 188.7°,并不满足 180° 的实际要求。为此我们对该膜系的最外层进行优化设计,得到了如图 5 所示的设计结果,其在 1 315nm 处的反射位相延迟为 180.04°,满足要求,且膜系的反射率基本保持不变。

该膜系膜层内 S 偏振分量的电场分布如图 6 所示,在空气与最外层膜的界面上电场强度为极小值,紧接着

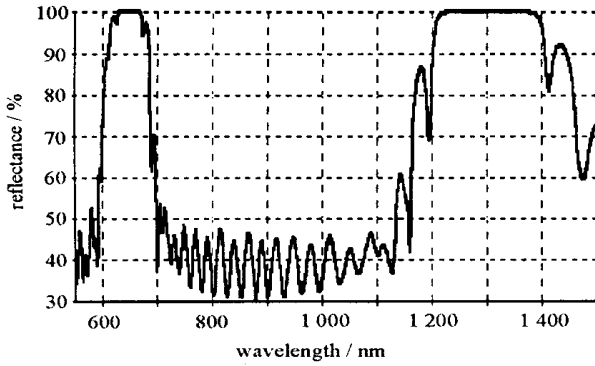


Fig. 3 Theoretical reflectance curve at 45° incidence for the new high reflection film stack

图3 45°入射时新设计膜系的理论反射率曲线

在其相邻的高低折射率材料界面上的电场强度便降为最大峰值强度的1/8左右,其它各界面的电场强度依次降低。因此,从膜层内的电场分布情况来看,该膜系不需要作其它调整就有较理想的低损耗的结果。

## 2 结论

本文从膜层内的电场分布和对膜系的相移要求出发,利用倍频的设计思想,对COIL腔内45°入射双波长高反射镜进行设计,得到了新的膜系结构。此膜系与传统的膜系相比,在保持膜层总厚度不变的情况下,大大降低了高折射率膜层的

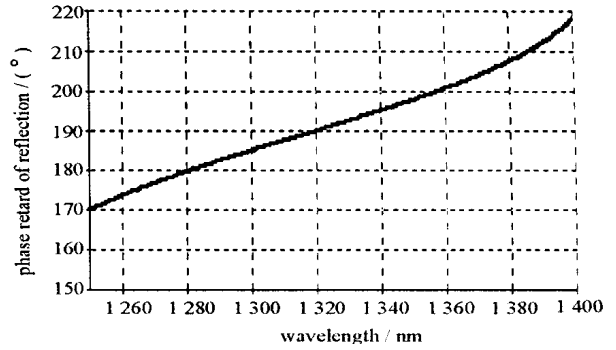


Fig. 4 Theoretical phase retard curve at 45° incidence for the new high reflection film stack

图4 45°入射时新设计高反射膜系的理论反射位相延迟曲线

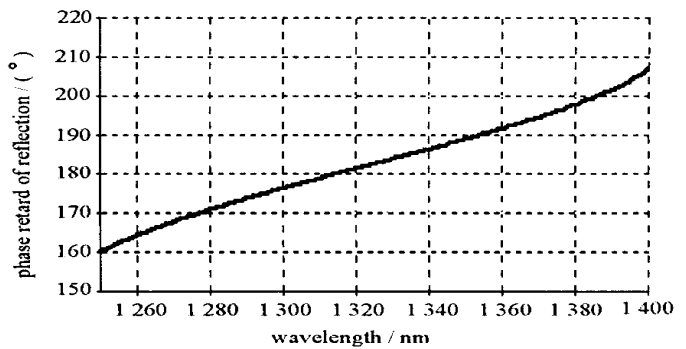


Fig. 5 Theoretical phase retard curve at 45° incidence for the new high reflection film stack

图5 新设计45°入射高反射膜系被优化后的理论反射位相延迟曲线

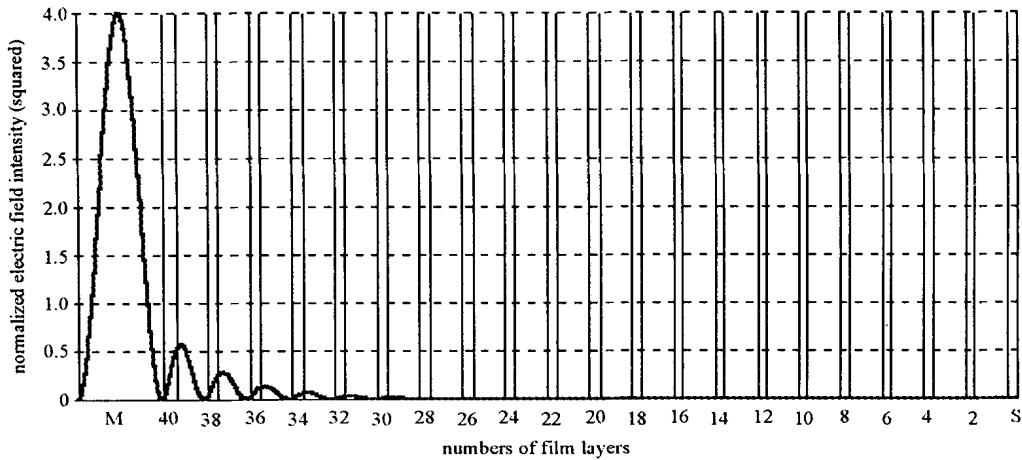


Fig. 6 Electric field distribution for S polarization within the new high reflection film stack at 45° incidence

图6 45°入射时S分量在新设计高反射膜堆内的电场分布

厚度。因此,该膜系有望大大降低膜系的吸收和散射损耗,使得膜层的损伤阈值进一步提高。

## 参考文献:

[1] 王英剑,宋永香,张蕾,等. 关于制备1315nm 45°入射高反射镜的实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2000, 12(s0):83—86. (Wang YJ, Song Y X, Zhang L, et al. The study of making and characteristic of the 45°high reflection thin film at 1315nm. *High Power Laser and Particle Beams*, 2000, 12(s0):83—86)

[2] 黄伟,张云洞. 极高反射率氧碘激光腔镜研制[J]. 强激光与粒子束, 1999, 11(5):564—568. (Huang W, Zhang YD. Manufacture of the resonator mirror of COIL with very high reflectivity. *High Power Laser and Particle Beams*, 1999, 11(5):564—568)

[3] Thomsen M, Wu ZL. Polarizing and reflective coatings based on half-wave layer pairs[J]. *Applied Optics*, 1997, 36(1):307—313.

- [4] 孙连春, 刘亚辉, 白继迅. 倍频反射膜的研究[J]. 光学学报, 1983, 3(5): 476—479. (Sun L C, Liu Y H, Bai J X. The study of multiple frequency reflection film. *Acta Optica Sinica*, 1983, 3(5): 476—479)

## Design of high reflection coating in COIL resonator at 45° incidence

LI Gang, GAO Jir-song, SUN Lian-chun

(*State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, the Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022, China*)

**Abstract:** From the electric field distribution and the phase shift requirement for the film, the mirror coating in COIL resonator at 45 deg incidence angle is designed using multiple frequency design method. A new high reflection design at two wavelengths (632.8nm and 1315nm) is attained with 180 deg phase retard at 1315nm. Compared with the conventional design, the thickness of high refractive index material of the new design is reduced largely. Hopefully, the performance of the mirror can be improved greatly.

**Key words:** High reflection mirror; Multiple frequency design; Phase retard; Electric field distribution