

文章编号: 0258-7025(2002)Supplement-0462-03

# 1315 nm 高反射率硅镜的膜系分析\*

彭玉峰 程祖海 张耀宁 周次明 杨春华

(华中科技大学激光技术国家重点实验室, 武汉 430074)

**提要** 利用 TFCALC 薄膜设计软件包对  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ ,  $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$  和  $\text{Si}/\text{SiO}_2$  膜系中心波长为 1315 nm 的硅镜反射特性进行了仿真模拟。给出了正入射与  $45^\circ$  斜入射情况下三种膜系硅镜的反射特性, 并进行了分析与讨论。

**关键词** 化学氧碘激光器, 硅镜, 高反射率, 薄膜

中图分类号 O484.5 文献标识码 A

## Analyses of Si-mirror Film Systems with High Reflectance at 1315 nm

PENG Yu-feng CHENG Zu-hai ZHANG Yao-ning ZHOU Ci-ming YANG Chun-hua

(National Key Laboratory for Laser Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

**Abstract** Reflectance properties of silicon mirrors with  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ ,  $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ , and  $\text{Si}/\text{SiO}_2$  film systems at 1315 nm are numerically analyzed, and discussed under conditions of normal and  $45^\circ$  tilt angle incidence, respectively. The results show that reflectance properties of  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$  and  $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$  are similar; theoretical reflectivity is less than 99.95% for 1315 nm laser wavelength. Theoretical reflectivity of  $\text{Si}(c)/\text{SiO}_2$  stack can be more than 99.99%.

**Key words** COIL, silicon mirrors, film, high reflectivity

## 1 引言

随着高功率激光器, 尤其是化学氧碘激光器(COIL)的不断发展, 对激光光学元件的性能要求越来越高。为了满足实际需要, 用于 COIL 的高反射硅镜的反射率应达到 99.95% 以上, 以减少镜面热畸变, 提高其抗激光损伤能力。早在十多年前, 美国的有关专家就把激光薄膜作为急待解决的关键技术。近年来, 国外的强激光薄膜发展很快, 1315 nm 波长高反射镜的反射率已达 99.9% 以上, 有的甚至达到 99.99%。

$\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$  膜系是目前制备高反射镜采用较多的膜系之一。该膜系比较成熟, 制备工艺较为稳定。但该膜系的本征吸收较大, 影响到激光损伤阈值的提高。而且材料组合相对较不稳定, 其峰值波长易受湿度的影响。若采用 Si 和  $\text{SiO}_2$  做镀膜材料, 用于 1.0~3.0  $\mu\text{m}$  波长范围, 薄膜吸收系数极小, 而且耐久稳定。由于 Si 在红外区的折射率较高, 因此仅需

要较少的膜层数、较薄的膜层厚度即可满足设计使用需要, 大大提高了镀膜效率。

## 2 膜系设计

由于短波长 COIL 输出激光波长处于红外波段, 在实际应用中激光腔镜需用可见激光进行调整或引导, 因此要求激光腔镜采用 1.315  $\mu\text{m}$  COIL 激光和 0.6328  $\mu\text{m}$  He-Ne 激光双波长反射膜。对于双波长反射膜, 采用两个膜堆叠加的方法可使 1.315  $\mu\text{m}$ , 0.6328  $\mu\text{m}$  两个波段高反射, 即  $G/(L_1H_1)^n(L_2H_2)^m/A$ 。其中  $G$  代表基片,  $A$  代表空气;  $(L_1H_1)^n$  代表 0.6328  $\mu\text{m}$  膜堆,  $(L_2H_2)^m$  代表 1.315  $\mu\text{m}$  膜堆。

### 2.1 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 膜系

该膜系比较成熟, 制备工艺较为稳定。可制得较高反射率数值, 是目前采用最多的方案之一。膜系结构为  $G/(0.48L0.48H)^5(LH)^{14}/A$ , 其中  $G$  代表硅基片,  $H$ 、 $L$  分别代表膜厚为  $\lambda_0/4$  ( $\lambda_0 = 1315$  nm) 的高、低折射率膜层, 它们分别为  $\text{TiO}_2$  和  $\text{SiO}_2$ 。图 1 为利用 TFCALC 薄膜设计软件包计算得到的

\* 国家“863”计划(410-4-8)、国家自然科学基金(69878008)、教育部重点基金资助课题。

该膜系反射率光谱曲线。

$\text{TiO}_2$  折射率为 2.2, 消光系数为  $7.9 \times 10^{-5}$ ,  $\text{SiO}_2$  折射率为 1.46, 消光系数为  $2.2 \times 10^{-6}$ 。基板厚度为 10 mm。计算结果表明:用这两种材料制备

的反射膜所能达到的正入射反射率极限值为 99.9764% ( $\lambda_0 = 1315 \text{ nm}$ ),  $45^\circ$  角斜入射反射率极限值为 98.81% ( $\lambda_0 = 1315 \text{ nm}$ )。膜层总厚度为 6110 nm。

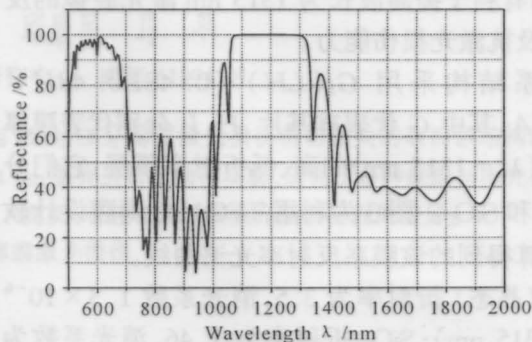
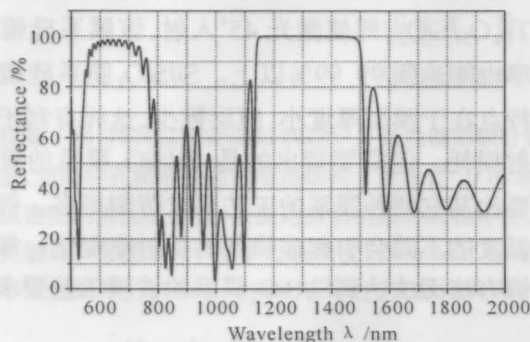


图1  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$  膜系硅镜的反射率光谱特性。(a) 正入射; (b)  $45^\circ$  斜入射

Fig.1 Reflectance spectra for  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$  stack on Si. (a) Normal incidence; (b)  $45^\circ$  incidence

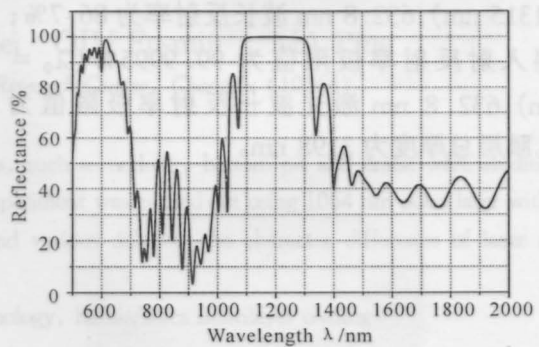
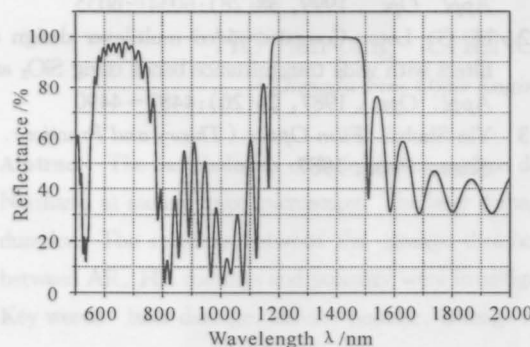


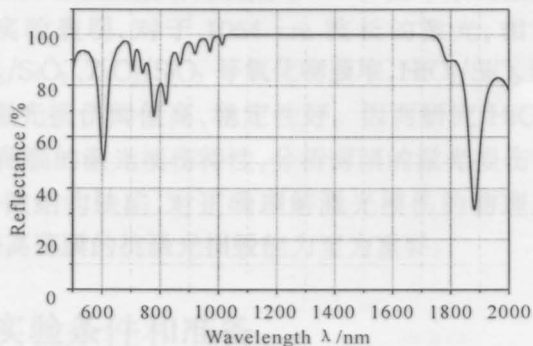
图2  $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$  膜系硅镜的反射率光谱特性。(a) 正入射; (b)  $45^\circ$  斜入射

Fig.2 Reflectance spectra for  $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$  stack on Si. (a) Normal incidence; (b)  $45^\circ$  incidence

## 2.2 $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ 膜系

膜系结构仍为  $G/(0.48L0.48H)^5(LH)^{14}/A$ , 其中  $G$  代表硅基片,  $H$ 、 $L$  分别代表膜厚为  $\lambda_0/4$  ( $\lambda_0 = 1315 \text{ nm}$ ) 的高、低折射率膜层, 它们分别为  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  和  $\text{SiO}_2$ 。图 2 为利用 TFCALC 薄膜设计软件包计算得到的该膜系反射率光谱曲线。

$\text{Ta}_2\text{O}_5$  折射率为 2.05, 消光系数为  $2 \times 10^{-5}$ ,  $\text{SiO}_2$



折射率为 1.46, 消光系数为  $2.2 \times 10^{-6}$ , 基板厚度为 10 mm。计算结果表明:用这两种材料制备的反射膜所能达到的正入射反射率极限值为 99.966% ( $\lambda_0 = 1315 \text{ nm}$ ),  $45^\circ$  角斜入射反射率极限值为 95.584% ( $\lambda_0 = 1315 \text{ nm}$ )。膜层总厚度为 6356 nm。

## 2.3 $\text{Si}/\text{SiO}_2$ 膜系

由于  $\text{Si}$  和  $\text{SiO}_2$  这两种材料在  $1.0 \sim 3.0 \mu\text{m}$  波

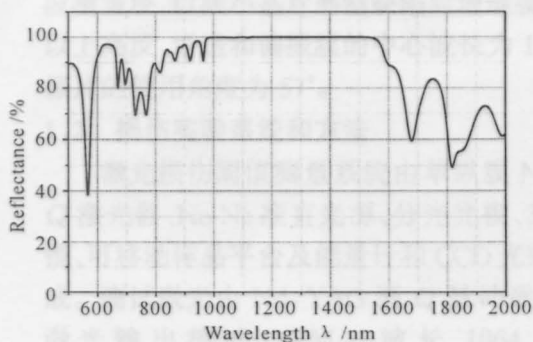


图3  $\text{Si}/\text{SiO}_2$  膜系硅镜的反射率光谱特性。(a) 正入射; (b)  $45^\circ$  斜入射

Fig.3 Reflectance spectra for  $\text{Si}/\text{SiO}_2$  stack on Si. (a) Normal incidence; (b)  $45^\circ$  incidence

长范围消光系数极小( $10^{-5} \sim 10^{-7}$ )而且耐久稳定,再加上 Si 在红外区的折射率较高,因此仅需要较少的膜层数、较薄的膜层厚度即可满足设计使用需要,大大提高镀膜效率。另外, Si 的热导率高,热畸变小,从而有利于提高波长为 1315 nm 激光腔镜的反射率以及抗激光损伤能力。

膜系结构采用  $G/(LH)^8(0.48L0.48H)^2(LH)^1/A$ , 其中  $G$  代表硅基片,  $H$ 、 $L$  分别代表膜厚为  $\lambda_0/4$  ( $\lambda_0 = 1315 \text{ nm}$ ) 的高、低折射率膜层, 它们分别为 Si 和  $\text{SiO}_2$ 。图 3 为利用 TFCALC 薄膜设计软件包计算得到的该膜系反射率光谱曲线。

Si (晶态) 折射率为 3.5, 消光系数  $1.3 \times 10^{-6}$  ( $\lambda_0 = 1315 \text{ nm}$ );  $\text{SiO}_2$  折射率为 1.46, 消光系数为  $2.2 \times 10^{-6}$ 。计算结果表明: 用这两种材料制备的反射膜所能达到的正入射反射率极限值为 99.9997% ( $\lambda_0 = 11315 \text{ nm}$ ), 632.8 nm 波长反射率为 86.7%;  $45^\circ$  角斜入射反射率极限值为 99.9995% ( $\lambda_0 = 1315 \text{ nm}$ ), 632.8 nm 激光波长反射率极限值为 97.1%。膜层总厚度为 3198 nm。

### 3 分析与讨论

根据上述数值模拟结果可以看出:  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$  和  $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$  膜系硅镜的反射率特性比较接近;  $\text{Si}/\text{SiO}_2$  膜系的反射率大大高于  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$  和  $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ , 即使激光  $45^\circ$  入射, 该膜系硅镜的反射率也能达到 99.99% 以上。  $\text{Si}/\text{SiO}_2$  膜系硅镜的突出特点在于膜层厚度小、膜层数少, 这样有利于降低散射损耗。但需要指出的是,  $\text{Si}/\text{SiO}_2$  膜系的镀膜工艺要比其它两种膜系的工艺要求苛刻得多。例如基板温度的不同会引起硅膜层的折射率变化。常规的蒸镀方法无法达到  $\text{Si}/\text{SiO}_2$  膜系的镀膜工艺要求。

### 参 考 文 献

- 1 P. Baumeister. Dependence of the reflectance of a multiplayer reflector on the thickness of the outer layer. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(28):6034~6035
- 2 H. G. Lotz. Computer-aided multilayer design of optical filters with wide transmittance bands using  $\text{SiO}_2$  and  $\text{TiO}_2$ . *Appl. Opt.*, 1987, **26**(20):4487~4490
- 3 Yin Shubai. *Film Optics (Theory and Practice)*. Beijing: Science Press, 1987