

不同膜系结构的光学薄膜的 激光损伤研究

李仲伃 李成富 范正修 郭聚平

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

提 要

本文报道了偏振膜和 $1.06\mu\text{m}$ 高反膜的激光损伤。研究了膜系结构与损伤阈值的关系, 并对实验结果作了分析。

关键词: 偏振膜, 高反膜, 激光损伤。

一、引 言

提高光学薄膜的激光损伤阈值, 一直是从事高功率光学薄膜研制和激光研究的工作者所共同关心的问题^[1~2]。本文研究了膜系结构对激光损伤阈值的影响, 分析了改变膜系结构后损伤阈值提高的原因。膜系结构与损伤阈值关系的研究, 不仅加深了对损伤机制的了解, 同时找到了一种提高光学薄膜激光损伤阈值的有效途径。

二、实 验 条 件

1. 实验装置和方法

实验装置如图1所示。激光系统由一级振荡和二级放大的 YAG 激光器组成。振荡器为平凹腔, 采用 LiF:F_2^{-1} 晶体调 Q, 小孔光阑选模, 输出波长为 $1.06\mu\text{m}$, 模式为 TEM_{00} 模, 光强分布为高斯型, 脉宽(FWHM)为 10 ns。振荡器输出的激光束经过 Glan-Taylor 偏振棱镜, 1:2 的扩束望远镜和二级 YAG 放大器放大后, 由一消像差的非球面透镜 ($f=80\text{mm}$) 会聚在样品表面。样品安置在四维可调的精密调整梁上, 这不仅可以方便地移动样品, 同时还可以利用这个装置精确测定焦斑的面积。本实验中测得的焦斑直径 $d(1/e^2)$ 为 $59\mu\text{m}$ 。

损伤阈值的定义和测试方法与文献[3]相同。

2. 样品

选用了二组光学薄膜, 一组是偏振膜, 一组是 $1.06\mu\text{m}$ 的高反射膜, 它们的膜系结构的设计特点如下:

(1) 偏振膜。实验中所用的样品均为透过水平偏振, 反射垂直偏振的膜 ($T_p > 95\%$, $T_s < 1\%$)。膜系 I 是由 TiO_2 和 SiO_2 二种材料制成, 主膜系加匹配层共为 23 层。膜系 I 的

收稿日期: 1990年5月24日; 收到修改稿日期: 1990年8月9日

*本工作由国家自然科学基金资助。

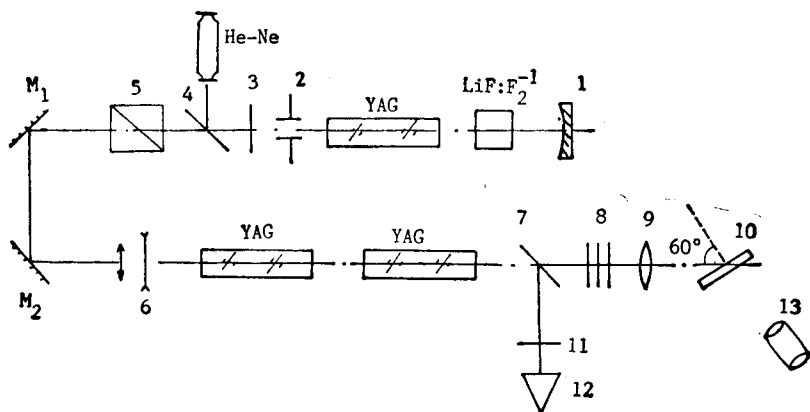


Fig. 1 Experimental setup for laser induced damage

1—rear mirror; 2—aperture; 3—output mirror; 4, 7—beam splitter;
5—polarizer; 6—beam expander; 8, 11—filter; 9—lens; 10—sample;
12—energy meter; 13—microscope

匹配层采用修正膜层厚度的方法来提高偏振特性。用这种方法虽然能制得偏振特性很好的偏振膜,但因偏振特性对膜厚度的变化相当灵敏^[4],而薄膜厚度又难以精确控制,因此很难稳定地获得高的偏振特性。

膜系 II 是由 TiO_2 , ZrO_2 和 SiO_2 三种材料组成,主膜系与膜系 I 相同,只是匹配层作了改变,采用等效折射率匹配法,即用 $\lambda/4$ 厚度的 ZrO_2 膜替代膜系 I 中的非 $\lambda/4$ 厚度的 TiO_2 膜,并适当增加几层匹配层,整个膜系共 31 层。该膜系工艺重复性好,偏振性能比较稳定。

膜系 III 与膜系 II 的结构基本相同,III 的主膜系比 II 少 2 层,此外加了 $\lambda/2 \text{SiO}_2$ 保护膜。

(2) 高反膜。膜系 I 为普通的 $1.06 \mu\text{m}$ 的高反膜,是由 15 层 $\lambda/4$ 厚高的 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 组成的。膜系 II 靠近基底的前 10 层与膜系 I 相同,从第 11 层以后增加低折射率层的厚度,从 $\lambda/4$ 增加到 $3/4\lambda$ 。膜系 III 是在膜系 II 上再加 $\lambda/2 \text{SiO}_2$ 保护膜。

(3) 激光束。对偏振膜的激光损伤实验用了三种不同偏振态的激光,即 $1.06 \mu\text{m}$ 的垂直偏振光 S , 平行偏振光 P 和普通激光,分别对三种不同膜系结构的样品进行了损伤实验。激光束以 60° 斜入射到样品上,斜入射是为了满足偏振膜设计和使用要求。

对 $1.06 \mu\text{m}$ HR 膜的损伤实验,用的是 $1.06 \mu\text{m}$ 垂直偏振的线偏振光,激光束垂直入射到样品上。

三、实验结果和分析

无论对那一种偏振态激光的损伤实验,偏振膜样品从膜系 I 到膜系 III,其损伤阈值均明显提高,实验结果如表 1 所示。 P 分量的损伤阈值比 S 分量高,普通激光的损伤阈值介于二者之间。膜系 II 比膜系 I P 分量的损伤阈值提高 30%, S 分量的损伤阈值提高 1~2 倍。

Table 1 Damage thresholds of polarizing coatings (J/cm^2)

sample	coating designs	P polarization	S polarization	conventional laser
S_1	I	5.60	1.20	1.88
S_2 S_3	II	7.72 7.37	3.22 2.17	— 3.15
S_4 S_5	III	13.02 13.53	7.54 8.08	— 9.07

Table 2 Damage thresholds of HR coatings

sample	coating design	damage threshold . (J/cm^2)
A_1 A_2	I: $G(\text{HL})^7\text{HA}$	16.7 14.4
A_3 A_4	II: $G(\text{HL})^5(\text{HSL})^2\text{HA}$	33.4 36.6
A_5 A_6	III: $G(\text{HL})^5(\text{HSL})^2\text{H2LA}$	50.5 52.2

膜系 III 比膜系 I P 分量提高一倍多, S 分量提高 5~6 倍。

高反膜的实验结果如表 2 所示。膜系 II 比膜系 I 损伤阈值提高了一倍多, 膜系 III 比膜系 I 提高约 2.5 倍。

根据驻波场理论, 可以计算出 P 偏振和 S 偏振的激光在偏振膜中的场强分布。文献[4]中已经给出了结果。由此可知, 在膜系 I 中 S 分量场强高的部位是在 TiO_2 膜上, 而在膜系 II 中 S 分量场强高的部位是在 ZrO_2 膜上, 一般情况下, ZrO_2 膜的损伤阈值比 TiO_2 膜高, 因此膜系 II S 分量的损伤阈值比膜系 I 有较大提高。 P 分量损伤阈值提高是因为 ZrO_2 膜比 TiO_2 膜吸收损耗小^[5], 膜系 II 用 ZrO_2 膜作匹配层有利于减少偏振膜总吸收损耗, 因而使 P 分量的损伤阈值也有一定的提高。

高反膜膜系结构改变后, 损伤阈值得以提高的机理, 可以从薄膜的微观结构分析中知道。 SiO_2 膜是无定形结构, 呈均匀的微粒状生长, 它沉积在 TiO_2 膜上, 可以嵌入其中填补 TiO_2 膜的缺陷。随着膜系中 SiO_2 层厚度的增加, 使 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 界面的结构得到了更好的改善, 界面变得均匀而平整, 因而使膜系 II 提高了抗激光损伤的强度。

保护膜能提高偏振膜和高反膜的损伤阈值, 其机理与上述情况相类似。通常偏振膜和高反膜的最外层是 TiO_2 或 ZrO_2 膜, 它们呈柱状结构^[6], 膜的表面粗糙, 不平整。镀了保护膜后, 表面变得光滑细致, 使膜的表面均匀性和微观结构得到改善。因此提高了膜的损伤阈值。

本文的结果表明, 膜系结构对光学薄膜的激光损伤阈值影响很大, 改进膜系结构能有效地提高光学薄膜的损伤阈值。

参 考 文 献

- [1] H. E. Bennett *et al.*; *Appl. Opt.*, 1984, **23**, No. 21 (Nov), 3782.
- [2] W. H. Lowdermilk *et al.*; *IEEE J. Q. E.*, 1987, **QE-17**, No. 9 (Sep), 1838.
- [3] 李仲伢等;《中国激光》,1989, **16**, No. 7 (Jul), 413.
- [4] 范正修等;《红外研究》,1982, **1**, No. 2 (Apr), 121.
- [5] 施正荣等;《中国激光》,1988, **15**, No. 1 (Jan), 22.
- [6] K. H. Guenther; *Appl. Opt.*, 1984, **23**, No. 21 (Nov), 3806.

Laser induced damage to optical thin films of different coating designs

LI ZHONGYA, LI CHENGFU, FAN ZHENXIU AND GUO JUPING

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800)

(Received 24 May 1990; revised 8 August 1990)

Abstract

In this paper, investigation of laser induced damage to polarizing coatings and $1.06\mu\text{m}$ high-reflection coatings is pre-sented. The relationship between damage thresholds and coating designs has been studied. The experimental results have been analysed.

Key words: laser damage polarizing coatings, high reflection coatings.