

偏振膜的激光损伤*

李仲伾 李成富 范正修 郭聚平

(中国科学院上海光机所, 201800)

提要: 本文报道了偏振膜的激光损伤特性, 研究了膜系结构与损伤阈值的关系及保护膜的作用。
关键词: 偏振膜, 膜系结构, 损伤阈值

Laser-induced damage in film polarizers

Li Zhongya Li Chengfu, Fan Zhengxiu, Guo Juping

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

Abstract: Laser damage characteristics of film polarizers are reported and the relationship between the damage thresholds, film-design structures and overcoats are investigated.

Key words: film polarizer, film-design structure, damage threshold.

偏振膜是激光系统中一种常用的光学薄膜, 为了使激光系统有较高的效率和很好的光学质量, 对偏振膜有很高的要求, 既要有很好的偏振特性(平行分量的透过率 $T_p > 95\%$, 高的消光比 $D \geq 1/100$), 又要有较高的激光损伤阈值。本文对偏振膜的激光损伤、膜系结构与损伤阈值的关系进行了研究。

一、实验装置和方法

进行光学薄膜激光损伤实验的装置如图1所示。激光系统由一级振荡和二级放大的 Nd:YAG 激光器组成。振荡器取平凹谐振腔, 采用 $\text{LiF}:\text{F}_2^{-1}$ 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 Gean-Taylor 偏振棱镜、1:2 的扩束望远镜和二级放大器放大后, 由一消像差的非球

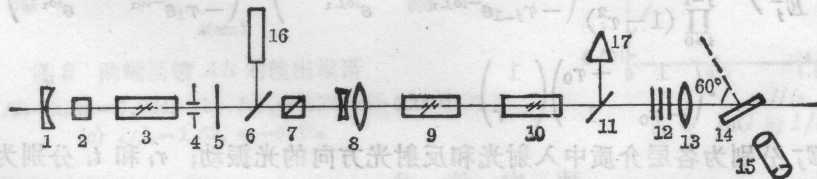


图1 实验装置

- 1—R=3m 全反射镜; 2—LiF 晶体; 3—YAG 振荡器棒; 4—小孔光阑; 5—输出腔镜; 6, 11—分束镜;
- 7—偏振棱镜; 8—扩束望远镜; 9, 10—YAG 放大器棒; 12—滤光片; 13—透镜; 14—样品; 15—显微镜;
- 16—He-Ne 激光器; 17—能量计

收稿日期: 1989年11月22日。

* 本工作由国家高技术基金资助。

面透镜($f=80.4\text{ mm}$)会聚至样品膜上。样品安置在四维可调的精密调整架上,还可利用该装置精确测定焦斑面积。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的要求。

测量焦斑面积用刀口扫描法^[1],测量的是垂直入射时焦斑的大小。斜入射时焦斑面积为

$$A = \frac{1}{4} \pi d^2 / \cos 60^\circ = \frac{1}{2} \pi d^2 \quad (1)$$

式中 d 为光强 $1/e^2$ 的焦斑直径,本实验测得 d 为 $59\ \mu\text{m}$ 。

损伤阈值的定义和测试方法见文献[2]。

二、实验结果和分析

实验中所用的样品均为部分透过水平偏振($T_p > 95\%$)、反射垂直偏振的膜($T_s < 1\%$)。膜系 I 是由 TiO_2 和 SiO_2 镀膜而成。膜系 II 由 TiO_2 、 ZrO_2 和 SiO_2 镀成。膜系 III 是在膜系 II 上再镀一层 $\lambda/2$ SiO_2 保护膜。

用 $1.06\ \mu\text{m}$ 的垂直偏振光、水平偏振光和普通激光分别对三种不同膜系结构的偏振膜进行了损伤研究,实验结果如表 1 所示。同一块样品用不同偏振态的激光进行损伤实验,所得到的损伤阈值不尽相同,然而它们之间有一定的规律性: P 分量的损伤阈值高于 S 分量,而普通激光的损伤阈值介于二者之间。

表 1 偏振膜的损伤阈值(J/cm^2)

样 品	膜系结构	水平偏振光	垂直偏振光	普通激光
S_1	I	5.60 ± 2.23	1.20 ± 0.25	1.88 ± 0.39
S_2	II	7.72 ± 2.41	3.22 ± 0.81	3.15 ± 0.73
S_3		7.37 ± 2.37	2.17 ± 0.50	
S_4	III	9.60 ± 3.84	7.54 ± 2.64	9.07 ± 3.63
S_5		13.53 ± 5.41	8.08 ± 3.23	

由驻波场理论推导出的公式可以求出任何一层膜中的场分布:

$$\begin{pmatrix} E_j^+ \\ E_j^- \end{pmatrix} = \frac{\prod_{i=1}^j t_i}{\prod_{i=0}^{j-1} (1-r_i^2)} \begin{pmatrix} e^{-i\delta_{j-1}} & -r_{j-1}e^{i\delta_{j-1}} \\ -r_{j-1}e^{-i\delta_{j-1}} & e^{i\delta_{j-1}} \end{pmatrix} \cdots \begin{pmatrix} e^{-i\delta_1} & -r_1e^{i\delta_1} \\ -r_1e^{-i\delta_1} & e^{i\delta_1} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & -r_0 \\ -r_0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ -r \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中 E_j^+ 和 E_j^- 分别为各层介质中入射光和反射光方向的光振动; r_i 和 t_i 分别为各界面上的反射系数和透射系数, δ 为薄膜内某一点相对于薄膜界面的光束位相变化; r 为全部膜层的反射系数。根据(2)式,我们对偏振膜内 P 分量和 S 分量的场分布的计算结果见文献[3]。本实验中偏振膜的设计与文献[3]中的有些差别,场分布也稍有不同,但是总的趋势和规律基本相同,利用文献[3]的结果并不影响对问题的分析。对 S 分量而言,偏振膜就如一块普通的反射膜一样,其场强最强区分布在临入射介质的表面几层膜内,最大强度小于入射光强,并且场强

随着层数的增加迅速衰减。 P 分量的光强分布在整个偏振膜,最大强度落在中间的几层膜上,表面膜层因场强低,对内部场强高容易损伤的膜层起了一定的保护作用,所以偏振膜对 P 分量有较高的损伤阈值,而 S 分量因为最大场强在膜的表面几层内,因此容易损伤。

膜系 I 的设计采用修正膜层厚度的匹配方法来提高偏振特性,用这种方法虽然能制得偏振性能很好的偏振膜,但因偏振特性对膜厚变化特别灵敏^[3],且薄膜厚度难以精确控制,因此影响膜偏振特性的稳定性。膜系 II 改用等效折射率匹配法,即用 $\lambda/4$ 厚度的 ZrO_2 膜替代非 $\lambda/4$ 的 TiO_2 膜,这种方法虽然增加了一种薄膜材料,然而工艺上比较方便,变多波长控制为单波长控制,省去了很多麻烦,而且制膜的重复性较好,偏振性能较稳定。实验结果表明膜系 II 不但偏振性能好,而且损伤阈值也高。膜系 II 比膜系 I P 分量损伤阈值高 30%, S 分量损伤阈值高 1 至 2 倍。 S 分量损伤阈值提高幅度大的原因是膜系结构改变了,使场强高的部位落在 ZrO_2 膜上。在一般情况下 ZrO_2 膜的吸收损耗比 TiO_2 小,而且 ZrO_2 膜的损伤阈值也高于 TiO_2 膜^[4],故膜系 II 比膜系 I S 分量的损伤阈值有明显的提高。 P 分量损伤阈值提高是因为膜系 II 选用 ZrO_2 膜作匹配层,而 P 分量是要透过整个偏振膜的, ZrO_2 膜吸收损耗小,无异对提高 P 分量的损伤阈值是有利的,同时损伤阈值高的 ZrO_2 膜作匹配层对整个膜系起了保护作用,因此 P 分量的损伤阈值也提高了。

表 1 中膜系 II 和 III 的 4 块样品的膜系结构和工艺条件基本相同,所不同的是在膜系 III 样品的表面上有一层 $\lambda/2$ 的 SiO_2 保护膜。实验结果表明,保护膜对提高偏振膜损伤阈值有明显的效果,使 P 分量的损伤阈值提高了 50%, S 分量提高 2~3 倍。由于 SiO_2 膜是无定形结构,它复盖在表面,改善了膜的表面形貌和微观结构,对提高偏振膜的破坏强度起了很好的作用。

膜系 III 的 2 块样品是在同样的条件下镀制而成的,然而它们的光学质量不尽相同,在显微镜下观察,样品 S_4 膜层的缺陷很多,而样品 S_5 缺陷明显减少。测量了它们的光学损耗, S_4 和 S_5 分别为 1.3×10^{-3} 和 6.0×10^{-4} 。从损伤结果来看,无论是那种偏振光, S_5 的损伤阈值均高于 S_4 。同样材料和工艺条件镀出来的膜,有时质量会有很大的差异,尤其是 ZrO_2 膜,杂质缺陷有相当大的起伏。我们曾经做过一组 ZrO_2 膜缺陷密度与损伤阈值关系的实验,测得 4 块样品的缺陷密度分别为 280、320、560 和 720 个/ mm^2 ,它们的缺陷密度可以相差 1~2 倍,随着缺陷密度的增加其损伤阈值几乎线性下降^[2]。由此可见,膜的损伤阈值与膜质量的好坏关系很大,膜层质量越好,缺陷越少,损伤阈值就越高;反之损伤阈值就越低。

以水平偏振光为例,膜系 II 的损伤阈值比膜系 I 提高了 30% 以上。膜系 III 比膜系 I 提高 1 倍左右。对垂直偏振光和普通激光提高的幅度就更大了。可见改进偏振膜的膜系结构对提高损伤阈值有很重要的作用。

参 考 文 献

- 1 A. H. Firester *et al.*, *Appl. Opt.*, **16**(7), 1971(1977)
- 2 李仲牙 *et al.*, 中国激光, **16**(7), 413(1989)
- 3 范正修 *et al.*, 红外研究, **1**(2), 121(1982)
- 4 施正荣 *et al.*, 中国激光, **15**(1), 22(1983)