

文章编号: 0258-7025(2006)06-0837-05

# 电子束蒸发制备平板偏振膜 激光损伤特性研究

毕 军<sup>1,2</sup>, 黄建兵<sup>1</sup>, 占美琼<sup>1,2</sup>, 张伟丽<sup>1</sup>, 易 葵<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800; <sup>2</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要** 采用电子束蒸发沉积技术制备了平板偏振膜。用 Lambda900 分光光度计测试了其光学性能。在中心波长 1053 nm 处 P 偏振光的透过率  $T_P > 98\%$ , S 偏振光的透过率  $T_S < 0.5\%$ , 消光比  $T_P/T_S > 200:1$ , 带宽约为 20 nm。用波长 1064 nm, 脉宽 12 ns 的脉冲激光进行损伤阈值测试, 获得 P 偏振光的损伤阈值为  $17.2 \text{ J/cm}^2$ , S 偏振光的损伤阈值为  $19.6 \text{ J/cm}^2$ 。用 Nomarski 显微镜对薄膜的损伤形貌进行观察, 并用 Alpha-500 型台阶仪对损伤深度进行测试。结果表明, P 偏振光的激光损伤为界面损伤与缺陷损伤, 而 S 偏振光的激光损伤主要是驻波电场引起的界面损伤, 界面损伤发生在偏振膜表面第一层与第二层界面处, 缺陷损伤发生在偏振膜内部。

**关键词** 薄膜; 平板偏振膜; 损伤阈值; 电子束蒸发

中图分类号 文献标识码 A

## Laser-Induced Damage of Flat Polarizer Prepared by Electron Beam Evaporation

BI Jun<sup>1,2</sup>, HUANG Jian-bing<sup>1</sup>, ZHAN Mei-qiong<sup>1,2</sup>,  
ZHANG Wei-li<sup>1</sup>, YI Kui<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)  
(<sup>2</sup> Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract** The flat polarizer was prepared by electron beam evaporation and its optical performance was measured by Lambda900 spectrometer. The transmission of P-polarization is more than 98%, the transmission of S-polarization is less than 0.5%, its extinction ratio is more than 200:1, and its spectral bandwidth is 20 nm near 1053 nm. The laser-induced damage thresholds (LIDTs) of P-polarization and S-polarization are  $17.2 \text{ J/cm}^2$  and  $19.6 \text{ J/cm}^2$ , respectively, measured at 1064 nm wavelength, 12-ns pulse width and the incident angle of  $60^\circ$ . The morphology of the laser-induced damage was characterized by Nomarski microscopy and its depth was measured by Alpha-500 step meter. Two distinct damage morphologies (defect and delamination) were observed when polarizer was tested in P-polarization. The character of interface caused the outer layer delamination damage morphology and which happened at hafnia-silica interface of the outer layer. The defect damage was induced by the defects in the film, and it appeared in the interior of the polarizer. In the case of S-polarization, the outer layer delamination damage morphology, which was induced by standing electric field was also observed.

**Key words** thin film; flat polarizer; laser-induced damage threshold; electron beam evaporation

## 1 引 言

平板偏振膜在 20 世纪 70 年代后期开始应用于强激光系统, 主要用作光隔离或光开关。其性能对整个激光系统的设计与性能有着重大的影响<sup>[1~3]</sup>。

为了获得尽可能高的效率和尽可能好的光学质量, 平板偏振膜应具有如下特点: 尽可能高的平行分量 (P 偏振光) 透过率  $T_P$ , 尽可能低的垂直分量 (S 偏振光) 透过率  $T_S$ , 足够高的消光比, 应用于高功率激光系统的平板偏振膜应具有高的激光损伤阈值。

收稿日期: 2005-11-25; 收到修改稿日期: 2006-02-23

作者简介: 毕 军 (1978—), 男, 山东人, 中国科学院上海光学精密机械研究所硕士研究生, 主要从事大尺寸偏振膜的制备与性能研究。E-mail: bijun8150@163.com

平板偏振膜对 P 偏振光是高透的,而对 S 偏振光是高反的,这使得平板偏振膜对于 P 偏振光的激光损伤类似于增透膜,而对于 S 偏振光的激光损伤类似于高反膜。但是偏振膜的膜层数、膜系结构等又不同于一般的高反膜或增透膜,所以偏振膜的损伤又有着自身的特点。对于平板偏振膜损伤前人已经做了不少工作,但是往往局限于某一种偏振光的损伤,或者是 P 偏振光的损伤<sup>[2]</sup>,或者是 S 偏振光的损伤<sup>[4]</sup>,很少把两种偏振光的损伤联系起来。在损伤的研究上大多注重于损伤形貌<sup>[3,4]</sup>的分析,而很少把损伤形貌与损伤深度联系起来。

本文按照国际上 ISO11254-1.2(光学元件激光损伤定义及规范)<sup>[5]</sup>以及美国国家航空航天局(NASA)制定的光学材料激光损伤阈值测试标准<sup>[6]</sup>,对制备的高光学性能平板偏振膜,进行了 P 偏振光和 S 偏振光的激光损伤测试,并对损伤形貌及损伤深度进行了分析,指出了偏振膜在不同偏振光作用下的损伤类型与损伤位置间的联系。

## 2 平板偏振膜的制备

平板偏振膜样品是在 ZZSX-800F 型真空物理气相沉积(PVD)镀膜系统中,用电子束蒸发方法沉积而成的;膜层厚度采用 KM-2A 型光学膜厚控制仪控制。基底材料为 $\phi 30\text{ mm} \times 3\text{ mm}$  BK7 玻璃,镀膜前用含有丙酮的脱脂棉纱布擦拭干净。由于不同膜料的薄膜的抗激光损伤能力不一样<sup>[7]</sup>,根据平板偏振膜的抗激光损伤要求,高折射率膜料选用  $\text{HfO}_2$ ,低折射率膜料选用  $\text{SiO}_2$ ,其中  $\text{HfO}_2$  的沉积速率为  $0.4 \sim 0.6\text{ nm/s}$ , $\text{SiO}_2$  的沉积速率为  $0.8 \sim 1.0\text{ nm/s}$ 。本底真空度为  $2.0 \times 10^{-3}\text{ Pa}$ ,烘烤温度为  $250\text{ }^\circ\text{C}$ 。由于膜料蒸发时会发生失氧现象,镀膜过程中同时向真空室中以  $22.5\text{ sccm}$  的流速充入氧气,使工作气压维持在  $2 \times 10^{-2}\text{ Pa}$  左右。

## 3 平板偏振膜的测试

### 3.1 平板偏振膜光谱性能测试

用 Lambda900 分光光度计(测量精度为  $\pm 0.08\%$ )对制备的平板偏振膜的光谱性能进行测试,结果如图 1(a)所示。制备的平板偏振膜具有在中心波长  $1053\text{ nm}$  附近的  $20\text{ nm}$  带宽范围内,P 偏振光的透过率大于  $98\%$ ,同时 S 偏振光的透过率小于

$0.5\%$ ,消光比大于  $200:1$ ,平板偏振膜光学性能良好。理论设计的光谱曲线如图 1(b)所示,对比理论设计与实际制备的平板偏振膜的光谱曲线,发现该工艺条件下能够很好地制备出理论设计的平板偏振膜。

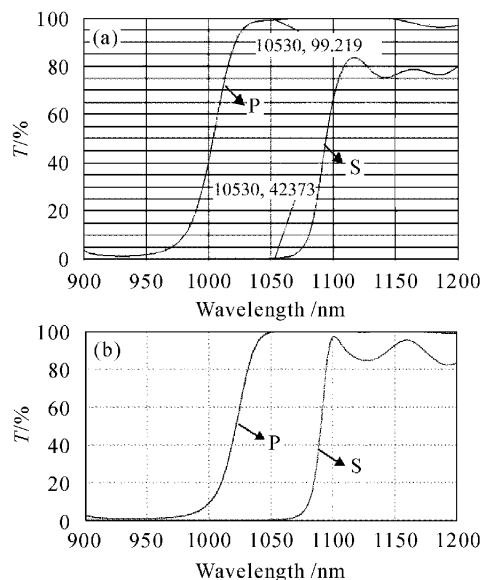


图 1 实际制备(a)和理论设计(b)的偏振膜光谱曲线  
Fig. 1 Measured (a) and design (b) optical performance of the polarizer

### 3.2 平板偏振膜激光损伤性能测试

激光损伤阈值测试装置如图 2 所示。激光系统由 Nd:YAG 振荡器组成。电光调 Q He-Ne 激光用于光路准直。进行损伤阈值测试时将起偏晶体(POL)调至所需要的 P 或 S 偏振光,同时将载有样品的二维测试架(2D Stage)调整到平板偏振膜的使用角度。激光测试参数及损伤定义方式如表 1 所示。

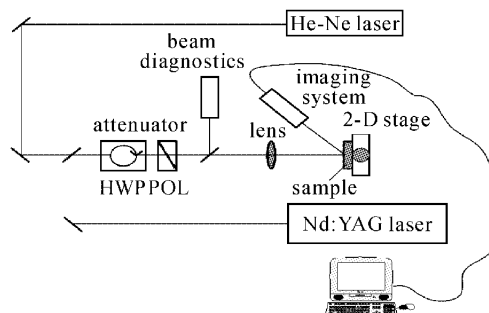


图 2 偏振膜的损伤测试装置  
Fig. 2 Measurement setup of laser-induced damage for the polarizer

表 1 偏振膜激光损伤测试参数

Table 1 Parameters of laser-induced damage for the polarizer

Laser wavelength /nm	1064
Mode of operation	TEM <sub>00</sub>
Polarization	P,S
Testing method	1-on-1
Pulse duration /ns	12
Spot size	658 μm×362 μm
Angle of incidence /(°)	60
Definition	Zero probability

将膜面在激光作用下出现的永久性变化定义为薄膜损伤,其判断用放大至少 100 倍的 Nomarski 干涉偏光显微镜。损伤阈值的定义采用零概率损伤阈值,并明确定义损伤阈值为一个薄膜可能承受的最大峰值能量密度。平板偏振膜在 P 偏振光和 S 偏振光作用下的损伤阈值如图 3 所示,其中 P 偏振光的损伤阈值为 17.2 J/cm<sup>2</sup>,S 偏振光的损伤阈值为 19.61J/cm<sup>2</sup>,比 P 偏振光的高。

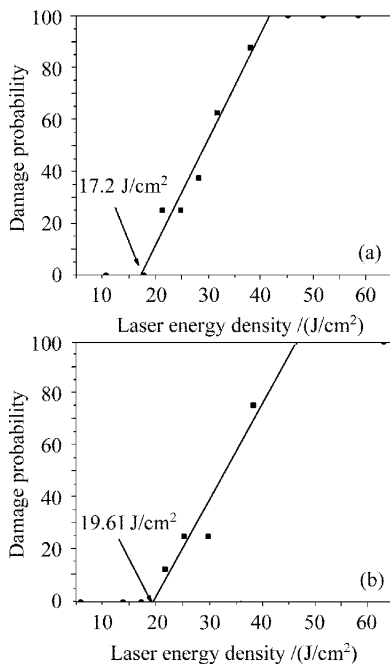


图 3 P 偏振光(a)和 S 偏振光(b)的损伤阈值  
Fig. 3 Laser-induced damage threshold of P-polarization (a) and S-polarization (b)

### 3.3 损伤形貌与损伤深度的测量

在 Nomarski 显微镜下观察 P 偏振光与 S 偏振光作用下样品表面的损伤形貌,发现 P 偏振光作用下样品具有缺陷损伤与分层损伤两种,图 4(a)为同

时具有这两种情况的典型损伤形貌;而 S 偏振光作用下都为分层损伤,损伤形貌如图 4(b)所示。

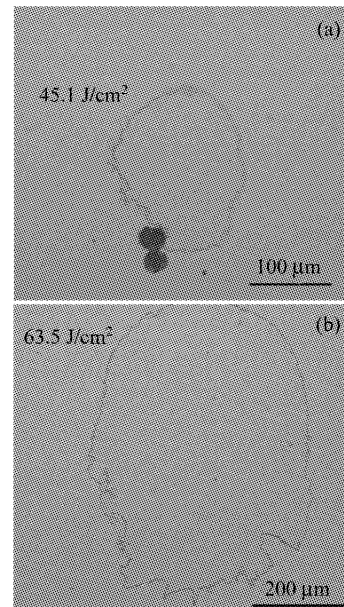


图 4 偏振膜 P 偏振光(a)和 S 偏振光(b)损伤形貌  
Fig. 4 Morphology of P-polarization (a) and S-polarization (b) damage

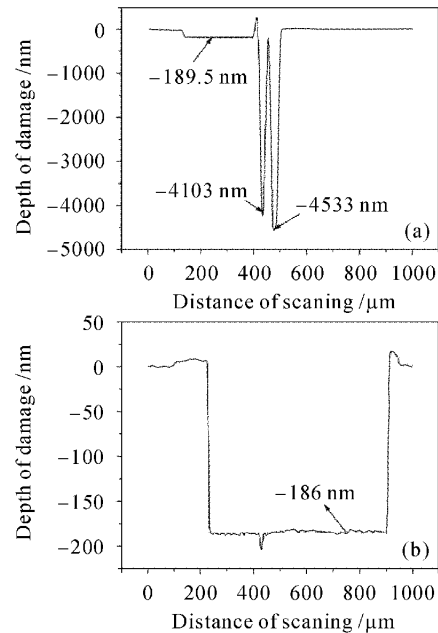


图 5 P 偏振光(a)和 S 偏振光(b)的损伤破斑深度  
Fig. 5 Depth of P-polarization (a) and S-polarization (b) damage

在 Alpha-500 型台阶仪上对偏振膜 P 偏振光与 S 偏振光作用下样品的损伤深度进行测试,发现典型的深度信息如图 5 所示。

## 4 讨 论

平板偏振膜对于 P 偏振光而言是高透的,而对于 S 偏振光而言是高反的。膜层中的电场分布如图 6 所示。

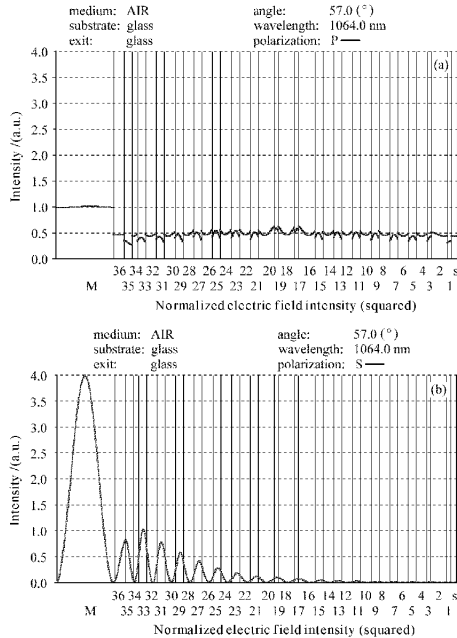


图 6 P 偏振光(a)和 S 偏振光(b)的电场分布  
Fig. 6 Electrical field intensity distribution of P-polarization (a) and S-polarization (b)

通过损伤形貌图 4(a)及损伤深度图 5(a),可以发现平板偏振膜对于 P 偏振光的损伤形貌主要分为平底分层状和小孔洞状两类。平底分层状破斑的深度为 189 nm 左右,而理论计算的平板偏振膜表面第一层 SiO<sub>2</sub> 的厚度为 188.3 nm。所以可认为,平板偏振膜在 P 偏振光作用下产生的平底分层状损伤,发生在偏振膜表面第一层 SiO<sub>2</sub> 与第二层 HfO<sub>2</sub> 之间的膜层界面处。这主要因为膜层与膜层之间的界面并不是理想的分层结构,而是一个渐变过程,并且膜层之间的界面吸收系数较大<sup>[8]</sup>,在激光辐照下界面层的温升极高<sup>[9]</sup>,所以很容易在膜层的界面处出现损伤而将最外面的一层破坏掉。P 偏振光另外一种损伤形貌为小孔洞状,从平板偏振膜中 P 偏振光电场分布图 6(a)可知,P 偏振光电场几乎无衰减地穿过整个膜层;而从损伤深度图 5(a)可知,小孔洞损伤产生于膜层内部,并且损伤深度是不确定的。出现这种现象主要是由镀膜过程中产生于膜层内部的缺陷引起的,由于镀膜过程中存在喷溅等现象,并且偏振膜镀制时间较长,所以缺陷在膜层内部的位置是不确定的;而且 P 偏振光完全透过偏振膜的所

有膜层,碰到膜层内部的缺陷而引起偏振膜破坏,产生如图 4(a)中的两个不同深度的小孔洞状损伤。

通过损伤形貌图 4(b)及损伤深度图 5(b),可以发现平板偏振膜对于 S 偏振光的损伤形貌仅仅为平底分层状破斑。破斑的深度为 186 nm 左右,这一深度恰恰是平板偏振膜表面第一层 SiO<sub>2</sub> 与第二层 HfO<sub>2</sub> 之间的界面处。通过 S 偏振光在膜层内的电场分布图 6(b),可发现偏振膜界面处最强电场出现在第一层与第二层交界面之间,而膜层界面的吸收系数远大于膜层内部<sup>[8]</sup>,这使得平板偏振膜的损伤出现在最外面第一层与第二层之间,为平底分层状破斑。由于偏振膜对于 S 偏振光是高反的,S 偏振光电场仅仅分布于偏振膜表面几层中,而在偏振膜的最外面几层出现缺陷的概率很低,所以偏振膜对于 S 偏振光来说基本不表现为缺陷损伤。

## 5 结 论

通过对制备的平板偏振膜在不同偏振态下的激光损伤分析,发现平板偏振膜对于 P 偏振光,损伤阈值达到 17.2 J/cm<sup>2</sup>。损伤形貌表现为平底分层状和小孔洞状两种,平底分层状损伤发生在膜面第一层与第二层之间,主要是由膜层本身的界面因素造成的;小孔洞状损伤发生在膜层内部不确定位置,主要是由膜层内部的缺陷引起的。平板偏振膜对于 S 偏振光,损伤阈值达到 19.6 J/cm<sup>2</sup>。损伤形貌为平底分层状结构,发生在膜面第一层与第二层之间,主要是由该位置较强的电场强度和较大的界面吸收系数引起的。

## 参 考 文 献

- 1 P. F. Gu, J. F. Tang. Laser-induced damage resistance of thin-film polarizers prepared by ion-assistant deposition [J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(2):81~83
- 2 U. B. Schallenberg, N. Kaiser. Damage-resistant thin-film plate polarizer [C]. *SPIE*, 1997, **2966**:243~249
- 3 F. Y. Génin, C. J. Stolz, M. R. Kozlowski. Growth of laser-induced damage during repetitive illumination of HfO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> multilayer mirror and polarizer coatings [C]. 28<sup>th</sup> Annual Symposium on Optical Materials for High Power Lasers Boulder, Colorado October 7~9, 1996. 1~10
- 4 F. Y. Génin, C. J. Stolz, T. Reitter *et al.*. Effect of electric field distribution on the morphologies of laser-induced damage in hafnia-silica multiplayer polarizers [C]. *SPIE*, 1997, **2966**:342~345
- 5 Lasers and laser-related equipment—Determination of laser induced damage threshold of optical surface [S]. 2000. ISO11254-1. 2
- 6 Laser Induced Damage Threshold and Certification Procedures of Optical Materials [M]. NASA Reference Publication 1395

(1997)

7 C. Floch, A. Roussel, C. Cordillot *et al.*. High damage threshold mirror and polarizers in the  $ZrO_2/SiO_2$  and  $HfO_2/SiO_2$  dielectric systems [C]. *SPIE*, 1992, **1624**:282~293

8 Wu Zhouling, Fan Zhengxiu. The study of volume and interface absorption in multilayer dielectric coatings [J]. *Acta Optica Sinica*, 1989, **9**(7):630~634  
吴周令,范正修. 多层介质膜的体吸收与界面吸收研究[J]. 光学

学报, 1989, **9**(7):630~634

9 Zhao Yuanan. Pulsed laser-induced damage mechanisms and laser damage testing techniques of optical thin film coatings [D]. *Dissertation for Doctor Degree of Shanghai, Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences*, 2005. 30~38  
赵元安. 脉冲激光对光学薄膜的损伤机理及测试技术研究[D]. 中国科学院上海光学精密机械研究所博士论文, 2005. 30~38



· 广告 ·

最佳全球供应商



LBO 专利号: 4,826,283 美国专利号  
88 1 02084.2 中国专利号  
2023845 日本专利号



我公司提供以下类型晶体:

- 非线性光学晶体
- 激光晶体
- 声光及电光晶体
- 双折射晶体
- 光折变晶体
- 晶体组件
- X-射线晶体
- 光学件

  
**BBO**

  
**BIBO**

  
**KTP**

  
**Nd:YVO<sub>4</sub>**

  
复合晶体

  
双晶晶体

  
蓝光组件

  
光学晶体

福建福晶科技有限公司

地址:福建省福州市杨桥西路155号 邮编:350002  
TEL:86-591-83710533 FAX:86-591-83711593  
http://www.castech.com E-mail: sales@castech.com