

激光光热偏转成象法无损检测光学薄膜的激光损伤^{*}

谈恒英 刘鹏程 施柏煊
(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室,杭州 310027)

摘 要 介绍了应用激光光热偏转成象法无损检测光学薄膜激光损伤的基本原理,由此建立了实验检测装置,对光学薄膜表面的激光损伤进行了扫描检测,并以直观的灰度象显示.实验结果证明了激光光热偏转成象法检测光学薄膜激光损伤具有直观、有效、可确定损伤阈值的优点.

关键词 光学薄膜;激光损伤;光热偏转法

中图分类号 TN247 TB303 **文献标识码** A

0 引言

在强激光的研究和工程应用中,许多光学元件,例如强激光器的腔镜、强激光传输中的反射镜、透镜等,其上的光学薄膜往往因为受到强激光的辐射而破坏,因此光学薄膜的激光损伤成为强激光技术及其应用的一大制约因素.由此,如何测试和评价光学薄膜的激光损伤成为许多光学薄膜和强激光技术研究者所关注的问题,目前已经提出了不少方法^[1~3],但还都不尽人意.根据光学薄膜的损伤是由于光学薄膜介质本身对激光能量超破坏阈值吸收而发生破坏的观点,利用对光学吸收具有超高灵敏度的光热偏转光谱探测技术,我们设计并建立了一套无损评价光学薄膜激光损伤的激光光热偏转成象检测装置.实验检测结果表明,装置对光学薄膜表面扫描所获取的面扫描光热偏转信号,通过数字图象处理,再现了光学薄膜在不同激光能量照射下的表面图象,由照射点和背景的区别,直观地显示出损伤情况,证明了光热偏转成象法无损评价光学薄膜激光损伤的高灵敏度和有效性.

1 基本原理

对光学薄膜的激光损伤情况实行无损评价的激光光热偏转成象法实际上是基于激光光热光谱探测技术,对所获取的面扫描光热偏转信号作编码成象,从而直观反映光学薄膜表面损伤的一个高灵敏度的探测方法^[4].简言之,光热偏转光谱探测技术是一种灵敏的光学吸收光谱检测技术.如图 1 所示,一束受调制的激光称为泵浦光照射到可被吸收的物质上(例如光学薄膜),物质因吸收该调制光而产生同步的调制热.这种调制热会扩散到邻近界面的空气中,并向吸收物质表面和深度方向扩散^[5],因而会在邻近物质

表面的空气中、物质的表面上和体内发生热透镜效应.通过另一束激光,称为探测光,或穿经该物质,或在该物质表面反射,或在邻近该物质表面的空气中掠射,其方向会发生偏转而得到光热偏转信号,就可得到该物质的光学吸收定量信息.图 1 中,探测光在样品表面反射,获取反射方向偏转信号的布置方式称为反射式光热偏转布置;探测光穿过物质,获取透过方向偏转信号的布置方式称为透射式光热偏转布置;探测光穿过表面空气,获取穿过空气后方向偏转信号的布置方式称为横向光热偏转布置.根据物质对探测光的透过特性,可选择其中之一来检测光热偏转信号.在我们的实验室,曾以此测得多种光学薄膜小到 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ 量级的吸收率^[6],证明这种探测技术对于光学薄膜吸收测量的超高灵敏度.光学薄膜对于激光能量的吸收因超破坏阈值的吸收而受到破坏,在破坏阈值以下,不同激光能量的作用都将对其光学吸收性能产生影响.经不同激光能量辐照的光学薄膜将具有不同的吸收特性,因而作为吸收物质,受泵浦光照射,就可检测到不同的光热偏转信号,特别地,受到破坏的光学薄膜,其光热偏转信号和不受破坏的相比会有更大的差别,因此光热偏转探测法可以用来有效地评价光学薄膜的激光损伤.

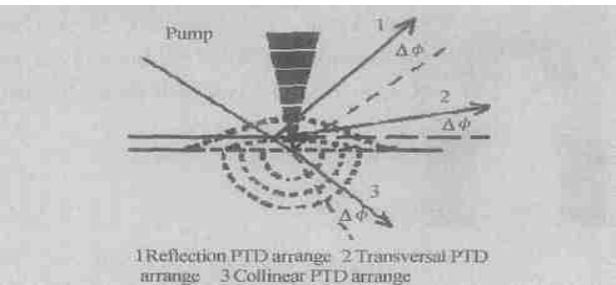


图 1 光热偏转效应和检测方式
Fig. 1 Diagram of photothermal deflection effect and detection arrange

2 光热偏转检测装置

如图 2 所示,我们所设计和建立的激光光热偏转成象检测装置主要包括:光学薄膜样品的三维扫

国家自然科学基金(批准号 10174067)资助项目
Tel :0571- 87952302 Email :tanhy @zju. edu. cn
收稿日期:2003- 03- 04

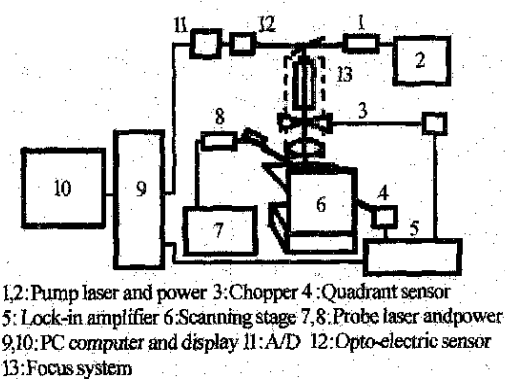


图 2 光热偏转实验检测装置

Fig. 2 Experimental testing set up for PTDM

描台 6;检测激光光热偏转信号的四象限检测器 4 和锁相放大器 5 以及对信号作归一化处理 and 数学图象处理并实行显示的个人计算机 9,它们和泵浦激光 1,探测激光 8 组成整体,以有机玻璃罩隔离环境空气的扰动. 三维扫描台使被测样品可在 x 、 y 、 z 三方向步进移动,其驱动源通过微机和上位机通信实现样品的自动面扫描检测. z 向移动用于校正样品面的初始位置,使光热偏转信号最大, x 、 y 向移动获取样品面各点二维光热偏转信号. 获取光热偏转信号的光学布置可在上节所述的三种布置方式之间互换,由被检测的光学薄膜(包括基底介质)对探测光的透光性确定. 泵浦光采用 He-Ne 激光(30 mW, 633 nm)或半导体激光(0~600 mW, 808 nm),探测激光采用方向稳定性优良的 He-Ne 激光(2 mW, 633 nm)或带准直系统的半导体激光(1 mW, 650 nm),泵浦光用特别设计的聚焦系统 13 准直和聚焦,聚焦点直径~10 μm (He-Ne 激光)和~1 μm (半导体激光,808 nm). 图 3 示意了透射偏转方式布置,其中 2、7 为激光器电源,3 是切光器,12 是监测泵浦光随时间漂移的硅光电二极管,所检测到的电信号经 A/D 器转换直接送个人计算机用于光热偏转信号的归一化. 10 是个人计算机的显示屏. 该检测装置对镀在玻璃表面的铝反射膜,用半导体激光作泵浦光,其光热偏转信号达 mV 量级;而对 $(\text{TiO}_2 + \text{ZrO}_2)/\text{SiO}_2$ 反射膜,以 He-Ne 激光作泵浦光,其光热偏转信号在几十 μm 以上,因此用于光学薄膜激光损伤的无损检测具有足够的灵敏度.

3 实验检测和结果

测试样品是镀在玻璃基底上对 520~550 nm 具有高反射率的 $(\text{TiO}_2 + \text{ZrO}_2)/\text{SiO}_2$ 多层介质膜和表面镀有 SiO_2 保护膜的 Al 反射膜,其中 $(\text{TiO}_2 + \text{ZrO}_2)/\text{SiO}_2$ 薄膜对 He-Ne 激光具有吸收特性,因此以输出功率 30 mW 的 He-Ne 激光作泵浦光. 同时该薄膜也透过 He-Ne 激光,所以用输出小功率 2 mW 的 He-Ne 激光作探测光,采用透射式光热偏转方式检测光热偏转

信号. 对 Al 膜样品,为探索使探测头小型化,泵浦光试用了输出功率 570 mW、波长在 808 nm 的半导体激光,探测光则试用了输出功率为 1 mW、波长在 650 nm 的半导体激光,考虑到 Al 膜对 650 nm 激光不透明性,采用横向光热偏转布置来获取光热偏转信号. 二种薄膜样品在测试前都作了预损伤处理:即通过聚焦到直径为 0.5 mm 光斑的 YAG 倍频激光脉冲,输出波长在 532 nm,以不同能量密度和频率对薄膜表面进行辐照. 获取信号时,样品相对于泵浦光焦点在 x 、 y 方向扫描,逐点获取样品的面扫描光热偏转信号,通过归一化、去噪和图象化等数字信号处理程序,编码为灰度象,称为光热象,直观地显示出不同激光能量照射点和背景的差别,从而表明薄膜的损伤情况.

图 3 所示是面积为 6.5 mm $\times$ 3 mm 的多层介质膜 $(\text{TiO}_2 + \text{ZrO}_2)/\text{SiO}_2$ 的光热象. 扫描抽样点的步距 x 方向为 65 μm , y 方向为 50 μm ,预损伤的辐照点有 5 个,其辐照的能量密度从左到右依次以 1、2、...5 编号,如表 1 所示.



图 3 玻璃基底上多层介质膜 $(\text{TiO}_2 + \text{ZrO}_2)/\text{SiO}_2$ 的光热象
Fig. 3 The PT image of Optical Film $(\text{TiO}_2 + \text{ZrO}_2)/\text{SiO}_2$

表 1 $(\text{TiO}_2 + \text{ZrO}_2)/\text{SiO}_2$ 光学薄膜表面 YAG 激光辐照条件

辐照点直径 (0.5 mm)	激光功率密度 (10^8 W/cm^2)	脉冲频率 / Hz	辐照次数 (次)
1	2.5	2	10
2	2.0	2	10
3	1.5	2	10
4	1.0	2	10
5	0.5	2	10

光热象直观地显示了左边 1、2 两点和背景不同的灰度,说明已经明显受损,辐照的激光能量密度更高的第一点更黑,表示受损更严重,而从第 3 点到第 5 点被背景灰度淹没,不能从背景灰度中识别出来,说明膜层并没有破坏,因此,可确定 $(\text{TiO}_2 + \text{ZrO}_2)/\text{SiO}_2$ 的损坏阈值为 $2.0 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$. 图中背景灰度象中有许多小点是由于从四象限检测器来的原始光热偏转信号上过大的噪声信号形成的,本实验是对已知不同阈值辐照的薄膜面上 5 个定点进行扫描检测,因此便很快确定了这些小点并不是由于辐照形成的损伤. 对于实际的样品,就不能确定损伤的位置,必须提高检测装置本身的信噪比,进一步的改进将利用输出功率大的泵浦光使背景信号一致.

图 4 是由面积为 $5\text{ mm} \times 11\text{ mm}$ 、表面镀 SiO_2 保护膜的 Al 反射膜作样品得到的光热象,对膜层预损伤的 YAG 激光脉冲辐照表面上从左到右的 10 个点,分别表为 1,2,3...10,其辐照能量密度如表 2 所示.



图 4 玻璃基底上 Al 反射膜的光热象

Fig. 4 PT image of reflective film Al on glass

表 2 具有保护膜 SiO_2 的 Al 反射膜的 YAG 激光辐照条件

辐照点	1,2	3,4	5,6	7,8	9, 10
功率密度 (10^8 W/cm^2)	8,72	4,05	1,38	0,66	0,22

获取光热偏转信号的扫描抽样点 x 、 y 二个方向的步距均为 $100\text{ }\mu\text{m}$,从光热象可见,左边连续 1~6 六个点可以从背景中区别出来,而右边连续 7~10 四个点和背景混为一色,这说明功率密度为 $1.38 \times 10^8\text{ W/cm}^2$ 的激光已对该 Al 膜造成损伤,从而可确定,对具有保护膜 SiO_2 的 Al 反射膜来说,对其造成损伤的 YAG 532 nm 激光的功率密度阈值为 $1.38 \times 10^8\text{ W/cm}^2$. 由于泵浦光是 808 nm 的半导体激光,输出功率达 570 mW,因此光热偏转信号达到 200 mV 以上,具有足够大的信噪比,使所显示的光热象的背景比较均匀.

4 结论

根据光学薄膜的激光损伤是由于超损伤阈值吸收受辐照激光引起和利用光热偏转光谱探测技术检

测光学薄膜的吸收特性具有超高灵敏度的原理,设计并建立了激光光热偏转成象法无损检测装置. 对预损伤的二种光学薄膜进行了光热偏转成象法的实验检测研究,初步实验结果表明,光热象可直观显示出光学薄膜的激光损伤情况,并可确定损伤阈值,证明了这种方法的可用性和有效性. 本文的实验,作为破坏薄膜的 YAG 激光辐照能量的变化间隔不够细,而辐照点成象,仅和背景灰度的区别来评价损伤的粗糙性有待改进,这一切和关于损伤细节的检测都正在作进一步的实验研究.

参考文献

- 1 Sheehan L, Schwartz S, et al. Automated damage test facilities for materials development and production optic quality assurance at Lawrence Livermore National Lab. *SPIE*, 1998, **3578**: 302~313
- 2 Sharp R, Runkel M. Automated damage onset analysis techniques applied to KDP damage and the Zeus small area damage test facility. *SPIE*, 2002, **3902**: 361~368
- 3 胡海洋, 范正修, 罗福. 1064 nm 窄带滤光片激光破坏研究. *光学学报*, 2001, **21**(7): 829~834
Hu H Y, Fan Z X, Luo F. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(7): 829~834
- 4 施柏焯, 谈恒英, 缪进. 利用激光引发的热透镜效应无损检测固体薄膜中的深度缺陷. *光子学报*, 2001, **30**(2): 174~178
Shi B X, Tan H Y, Miao J. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(2): 174~178
- 5 邢进华, 陈金星, 周军. 关于利用激光束偏转法测量热扩散率的研究. *光子学报*, 2002, **31**(8): 1035~1040
Xin J H, Chen J X, Zhou J. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(8): 1035~1040
- 6 Shi Baixuan, Chen Wenbin, Siu G G, et al. Error arising from original approximation in photothermal measurement of weak absorption of optical thin film. *Review of Progress in Quantitative NDE*, 1991, group 14, 169

Non Destructive Testing of Laser Induced Damage in Optical Thin Films by Laser Photothermal Deflection Image

Tan Hengying, Liu Pengcheng, Shi Baixuan

The State Key Lab. of Modern Optical Instrumentation Zhejiang University, Hangzhou 310027

Received date: 2003-11-24

Abstract The principle testing laser induced damage of optical thin films by laser photothermal deflection method (PTDM) and corresponding experimental testing set up are described. The laser induced damage on surface of optical thin films is tested by scanning surface using the set up. Grey image coded by tested two dimensional photothermal deflection signals is directly displayed and shown that the testing laser induced damage of optical thin films by PTDM possesses many advantages such as direct display of damage and determination of damage threshold. And the method is available.

Keywords Optical thin film; Laser induced damage; Photothermal deflection method



Tan Hengying Female, an associate professor, was born in Dec. 1943, engaged in education of engineering optics and research in applied optical technique for a long time. There are some publications: *Engineering Optics*, *Polarization of Light and Applications*, *Composite Experiments in Optical Information Science* etc. Now She is engaging in research of two terms supported by NSFC and 863 FC.