

文章编号 2095-1531(2014)05-0701-11

应用于高性能光学薄膜表征的光热光声检测技术

武潇野*, 张立超, 时光

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要: 本文介绍了光热与光声探测技术的基本原理, 结合光学薄膜的吸收测试、光学薄膜的激光辐照特性表征、激光损伤特性表征以及光学薄膜的机械性质表征等各种具体应用, 对激光量热法、光热偏转法、表面声波法等典型的光热、光声检测方法进行了分析; 阐述了这些方法的测试原理以及各自优势与不足。介绍了该领域利用这些方法取得的一些成果, 并就光声光热检测技术的发展趋势做了展望。

关键词: 光热方法; 光声法; 激光量热法; 激光辐照; 检测技术

中图分类号: 文献标识码: A doi:10.3788/CO.20140705.0701

Optical-thermal and optical-acoustics detecting techniques applied for the characterizations of high performance optical thin films

WU Xiao-ye*, ZHANG Li-chao, SHI Guang

(State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: wxy19881107@163.com

Abstract: In this paper, the basic principle of the optical-thermal and optical-acoustics detecting methods is reviewed. The common optical-thermal and optical-acoustics detecting methods are described. Combined with specific applications such as absorption test of optical films, characterization of laser irradiation and laser damage to the thin films and characterization of the mechanical properties of thin films, some typical detecting methods are analyzed including laser calorimetry technique, photothermal deflection technique, surface acoustic waves and so on. The advantages and disadvantages of these methods are indicated. Finally, some achievement in the field by these methods are summarized, and the prospect of these methods is presented.

Key words: optical-thermal method; optical-acoustics method; laser calorimetry; laser irradiation; detecting technique

收稿日期: 2014-06-12; 修订日期: 2014-08-15

基金项目: 国家科技重大专项资助项目 (No. 2009ZX02205)

1 引言

伴随着光学系统及光电探测系统日新月异的发展,对系统中的薄膜光学元件也提出了日益严苛的要求,全面满足实际使用过程中的光学性能、力学性能及环境适应性等综合性能指标,是未来薄膜光学元件必须解决的问题。作为指导薄膜制备工艺的前提条件,各种先进表征方法应运而生,而基于光声及光热原理的检测技术就是其中重要的一类方法。传统的光学薄膜特性测试方法包括光度法、椭偏法等。然而,随着光学技术的发展,利用这些方法对各类高性能光学薄膜进行测试有很大的局限性,测试参数种类较少,测试精度较低。为了全方位、更加精确地表征光学薄膜的特征,一些新型的测试方法(如光热法、光声法等)逐渐发展起来。近年来,高能激光技术的发展,对系统中光学薄膜的性能要求越来越高,比如高成像质量、高透过率、高反射率、低吸收以及良好的力学性能和较长的寿命等。这些都是满足光学系统成像质量的必要条件。首先,高能激光下,即使是十分微小的吸收也会造成光能的严重损耗。可以说光学薄膜器件的性能直接限制了整个光学系统的性能^[1]。其次,光学薄膜的力学性能(比如薄膜的应力、杨氏模量、填充密度等),是光学元件面形、表面粗糙度等指标的重要保证。此外,较长的薄膜寿命也对其拥有高的激光损伤阈值、强的环境适应性等提出了更加苛刻的要求。

为了制备高性能的光学薄膜元件,首先要有相应的检测手段。光热探测就是针对在高能激光辐照的情况下,对薄膜进行表征采用的一类方法,主要用于对光学薄膜短波吸收特性的精确表征。光热测试方法有很多种,随着技术的发展,该方法在测试精度上日益提高,适用范围不断扩大,成为薄膜探测的得力工具。而光声方法也是针对光学薄膜特性检测的一类新方法,主要用于对光学薄膜吸收、弹性性质以及亚表面损伤等方面的精确检测^[2-5],适用范围较广。

光热法和光声法的理论研究近年来逐渐走向成熟。本文综述了光热法和光声法的基本原理,介绍了几种基于光热原理的测试方法,并详细介

绍了利用光热法进行的光学薄膜器件的激光辐照特性的研究;介绍了光声法的基本原理,以及利用光声法对薄膜若干种重要特性的表征。

2 光热法的发展及主要应用

光热法就是在元件吸收难以直接精确获得的情况下,利用激光辐照时元件吸收产生的温度变化来间接获得元件吸收的方法。根据具体的测量方式不同,光热法又可细分为两类:第一类通过直接测量元件温度变化来推出元件的吸收,称为量热法^[6];另一类不直接对受热元件进行测量,而另外采用一束单独的探测光作用于在辐照激光作用下产生热变形的样品,而通过探测光的信号强度、方向或波前质量的变化间接计算出吸收,具体分为热透镜法^[7]、偏转法^[8]、波前法^[9]。

2.1 各种光热测试法的基本原理及其特点

2.1.1 激光量热法

在激光量热法(图1)中,利用脉冲激光照射镀膜样品。样品吸收激光能量后转化为热量导致温度上升。在连续(约几分钟)激光辐照及后续的冷却过程中,持续记录样品温度的变化(图2)。采用由传热方程推导出来的升温关系函数对测量得到的温度变化曲线进行拟合,从而获得样品的吸收。

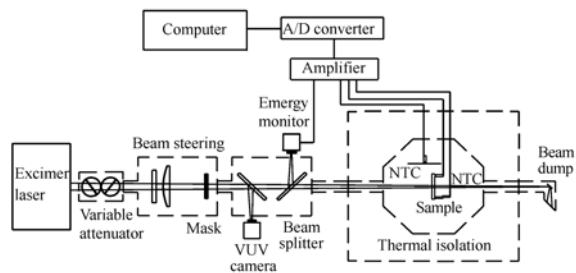


图1 激光量热法测试实验装置

Fig.1 Experimental facility of laser calorimetric technique

激光量热法的概念在20世纪70年代由 Pinnow 等人^[10]提出并进行了首次实验尝试。但在很长一段时间内,由于各种技术上的难度无法获得突破,量热法的精度一直难以提高^[11],阻碍了这一方法的大规模应用。随着高灵敏温度测量方

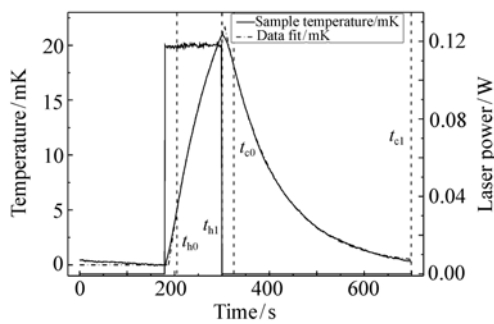


图2 激光量热法测量过程

Fig. 2 Measuring process of laser calorimetric technique

法和气体温度精密环控技术的逐步改进,激光量热法获得了长足的进展^[12],目前已成为测量光学元件微弱吸收的主流方法。目前基于该方法的激光量热装置的测量灵敏度已优于 10^{-6} 量级^[13],且具体测量规程也已经形成ISO11551的国际标准。

激光量热法的技术关键在于精确控制和测量加热与冷却过程中样品温度变化。由于元件的绝对吸收十分微弱,所以导致的温度变化值也很小,通常在 μK 的数量级,所以能否实现温度的准确测量就成为了影响激光量热法测试精度的关键因素。为此,首先要保证设备安装环境内的长期温度稳定性偏差不超过 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$;其次,激光量热仪的样品架必须放置在绝热样品仓内,如图3所示,样品仓必须确保密闭性,仓壁夹层必须保持良好的保温特性;此外,为确保测量温度能够准确代表样品

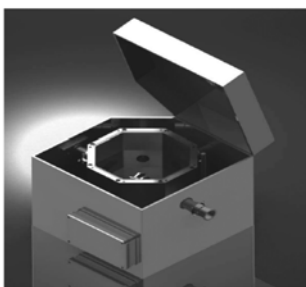


图3 激光量热装置样品仓

Fig. 3 Sample box of laser calorimetric technique

表面温度,测量温度的传感器要和样品架接触良好,并且在测量过程中需对箱体内充高纯氮气,以降低氧含量,从而减小空气吸收激光辐射所引起的温升,避免测试精度收到影响。

与其它方法相比,激光量热法具有很多优点。

首先,其测试原理基于直接的光热转换,更符合元件吸收过程的物理实质;其次,激光量热法获得的吸收数据来自于对光学元件温度的直接测量,不需要额外的标定过程,消除了来自于此方面的不确定度重要来源;另外,它的测试光路相对简单,不像热透镜法那样需要对泵浦激光和测试激光进行精确的相对位置调节,确保了测试的重复性。

然而,激光量热法也存在一些问题。首先,该方法难以用于区分基板吸收和薄膜吸收,因此在考察薄膜的吸收特性时,需在测试镀膜样品前,对未镀膜基板进行单独测量;其次,激光量热法的测试过程比较缓慢,通常一个测试需要经过包括前期环境稳定、激光辐照、降温等过程在内的近一个小时的时间,在此期间内,对环境温度、保护气体的纯度及温度等都有严格的要求;另外,受拟合原理限制,目前激光量热法对样品的尺寸存在严格要求,不能随意扩展到任意大小、任意形状的样品。这些问题都是激光量热法获得更广泛应用所需进一步解决的问题。

2.1.2 热透镜法

在热透镜法中,两束激光同时照射在样品表面上。如图4和图5所示,其中一束为应用波长的泵浦激光。在其照射下,元件会产生凸起形变,该凸起可近似简化为一个透镜曲面,即“热透镜”。另一束激光对准这一“热透镜”所在位置,可由探测器观察到泵浦激光辐照样品的前后,由“热透镜”处反射的探测激光的光强变化。实验

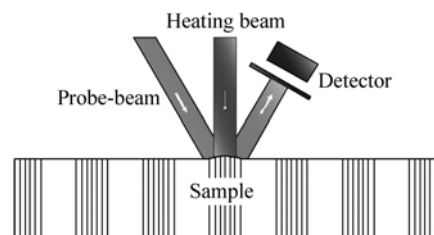


图4 热透镜法原理

Fig. 4 Principle of thermal lens technique

结果表明,在一定条件下,反射至探测器的探测激光中心光强会随热透镜厚度的改变呈线性变化^[14],而热透镜的厚度与薄膜的吸收率成正比^[15],因此表面热透镜技术可用于测量薄膜吸收。

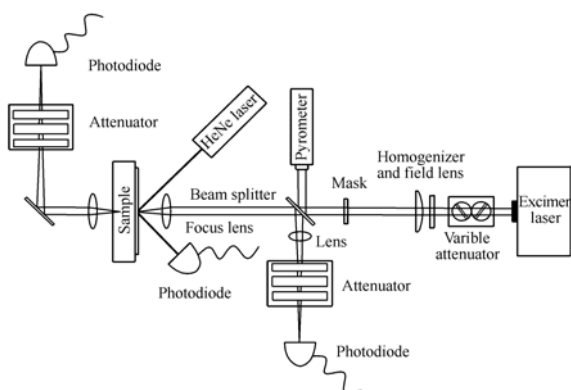


图5 热透镜法测试实验装置

Fig. 5 Experimental facility of thermal lens technique

通过对测试原理分析可知,热透镜法测得的信号对泵浦光与探测光的相对径向偏移十分敏感,所以该方法可实现极小热变形的探测,原理上最小可分辨的元件表面热变形为 $0.002 \text{ nm}^{[16-17]}$ 。但这一优点也可视作缺点,因为在测试光路中,两路激光相对位置要求极其严格,探测激光与探测器必须严格准直。因此,测量结果的精度严重依赖于两束激光的相对位置,测试光路调试困难,测试稳定性和复现性较差,测量参数难以优化。

另外,热透镜法的最大问题在于这是一种间接的测量方法,其测量结果并非绝对的吸收数值。因此若想采用这一方法获得准确结果,必须采用其它方法(如激光量热法)对其进行标定。由于上述原因,目前热透镜法的应用日益减少。

除了图4和图5所示的反射式热透镜法之外,还有一种透射式热透镜方法^[18]。由于在这一方式下,对探测光透射信号的解析必须考虑很多额外的因素,除了光热变形之外,还包括薄膜微形变、基板透射率、由于温度梯度而形成的折射率梯度等影响,分析起来更加复杂。

2.1.3 光热偏转法

光热偏转技术由 Boccara 等人在 1979 年提出^[19]。该技术的基本原理是:当样品受到脉冲泵浦激光照射时,样品对入射光的吸收导致样品内部产生与脉冲同步的周期性热波。当探测光入射到这一形变区域时,其出射方向会受到样品内部由热波引起的折射率空间变化的调制产生偏转,采用位置灵敏的探测器接收此偏转信号就可以获得关于样品的信息。具体的实验原理图如图6所

示。

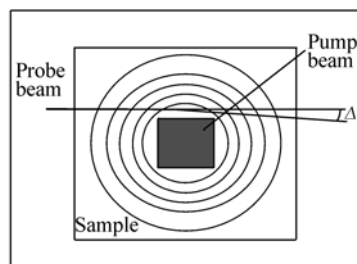


图6 光热偏转技术原理

Fig. 6 Principle of photothermal deflection technique

光热偏转法的最大优点在于泵浦光与探测光可分别灵活安排。在合适的光路配置情况下,可以不用进行镀膜前的预先测试,而直接实现薄膜吸收与体吸收的分离测量^[20]。

与热透镜方法类似,偏转法曾经一度存在不能实现绝对测量的问题,在经过 Mühlig 等人的改进后,这一问题已获得了解决^[21]。目前,偏转法存在的最大问题在于其精度:由于偏转信号的大小不仅与耦合介质的性质有关,还与薄膜的层数和材料有关,因此很难进行准确的标定。光热偏转法在测量普通单层膜时,精度约为 $10\% \sim 20\%$,在量定热导率较大的单层膜时误差甚至会超过 40% ^[22]。另外,由于标定方法的限制,该方法对样品的尺寸有严格限制,也成为了这一方法获得广泛使用的重要障碍。

2.1.4 波前法

波前法基于 1900 年由哈特曼提出的波前探测技术。哈特曼方法通常被用于光波在传播过程中波前质量的高精度测量。哈特曼探测法的主要原理就是在通光口径内放置一个含有许多规律排列小孔的光阑,然后分别测量通过光阑的每束光信号,就可以得到整个通光口径内光信号的波前信息。

近年来,哈特曼探测技术也被应用于薄膜吸收测试中。这种方法的原理如下:令一束激光经扩束后透射被测样品,在样品后方利用哈特曼波前探测器接受透射信号;利用另一束泵浦激光从与探测光成一定角度的方向照射样品时,由于样品的吸收,导致温度升高产生热变形,导致哈特曼波前探测器上接收的探测光波前信号发生变化;

通过与标准信号进行对比标定,就可以测出样品的吸收大小。

由于这种方法是一种位相敏感的波前探测技术,所以具有极高的精度,同时由于入射光在辐照样品前经过光阑扩束,因此可直接获得元件在大面积范围内的吸收特性,较其它方法更具潜力。

2.2 光热探测技术在薄膜激光辐照特性研究中的应用

利用激光量热法可以直接测试光学薄膜样品的吸收率大小。然而,在实际测试过程中,在高能激光的照射下,特别是在深紫外波段等特殊应用中,光学薄膜会表现出一些特别的吸收特性。

2.2.1 光学薄膜的非线性吸收

研究发现,在短波激光辐照下,光学元件会产生非线性吸收现象^[23-24],即材料对入射光的吸收率随激光能量密度的增加呈非线性增长。图7显示了熔石英材料在193 nm激光辐照条件下的非线性吸收。通常认为,材料的非线性吸收效应主要来自于多光子吸收。普通光源的多光子吸收极其微弱,几乎不可观测。但在短波如深紫外波段,双光子吸收则不可忽视,从而引起了非线性吸收^[25]。

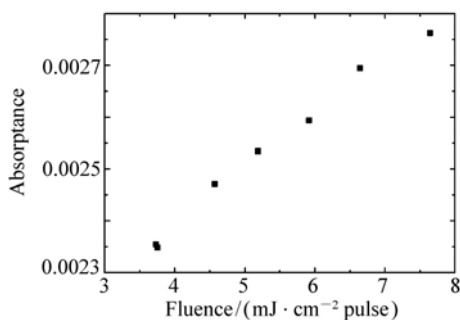


图7 熔石英基底在193 nm激光辐照条件下的非线性吸收

Fig. 7 Nonlinear absorbance of fused quartz under 193 nm laser radiation

进一步研究表明,非线性吸收并非只产生于基底,膜层同样会产生非线性吸收。Apel等人通过实验证明在193 nm准分子激光照射下,Al₂O₃薄膜具有线性吸收及非线性吸收特性^[26]。并且,Al₂O₃薄膜的线性吸收系数随薄膜厚度呈线性增长,非线性吸收系数随薄膜厚度增加成非线性增

长^[25]。文中指出这种非线性吸收随膜层厚度的非线性变化可能是双光子吸收与色心吸收共同作用的结果。这个结果揭示了深刻的物理机制,指引了进一步的研究方向。

2.2.2 激光辐照饱和剂量效应

通常在同一测试条件下,样品吸收率的测量数值应相同。在实际测试中,由于剂量效应现象^[27-28]的存在,致使在同一测量条件下测得的样品吸收率数值随测量次数逐渐降低。当激光照射剂量累积达到一定数值后,样品的吸收率在该测试条件下不再随测量次数变化。如图8所示。对剂量效应存在的原因,Balasa等人认为是样品表面杂质及吸附性有机物的清洁现象^[29];Mühlig等人则认为是在193 nm准分子激光照射下,熔石英内产生的E'(电子空穴)及ODC(氧缺陷色心)引起的^[30]。当对一样品进行吸收表征时,若样品存在剂量效应,同一测量条件对应不同的吸收数值。因此在研究样品吸收率与激光能量密度、照射频率、照射时间的关系前,应首先通过激光辐照使剂量效应得到释放^[29]。

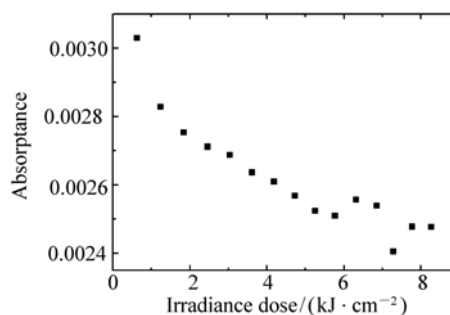


图8 熔石英基底在193 nm激光辐照条件下的剂量效应

Fig. 8 Dose-dependent effect of fused quartz under 193 nm laser radiation

2.2.3 激光损伤

在激光光学系统中,光学薄膜所能承受的激光辐照剂量和功率是一定的。超过这个阈值,光学薄膜就会发生损伤。在高能激光系统的发展中,光学薄膜的激光损伤阈值逐渐成为瓶颈,因此如何提高光学薄膜的激光损伤阈值就成为了焦点问题。激光损伤的机理比较复杂,不同的激光辐照方式、光学薄膜的结构、材质和制备工艺,都会导致不同的激光损伤过程和机理^[31-34]。如何正

确探测薄膜的激光损伤,也成为了研究工作的先决条件。

激光损伤可分为两种,一种是可直接由显微镜观察到的可观测损伤,另一种是无法采用成像方法观测到,但可通过辐照过程中吸收增长得出的不可观测损伤。以往对激光损伤的研究均集中在可观测损伤。Blaschke^[28]等人通过对 Al_2O_3 薄膜吸收测量,从测量角度上测试到了不可见的薄膜的激光损伤,并得到了获得薄膜激光损伤阈值方法。另外,徐俊海等人^[35]研究了镀膜工艺与对薄膜吸收的影响,并对薄膜样品的吸收与激光损伤阈值之间的关系进行比较。赵灵,张立超等人^[36-37]研究了深紫外激光辐照下激光能量与累积剂量造成的光学薄膜的不可恢复的损伤现象。上述研究为光学薄膜的工作条件和耐辐射能力的有效评估提供了新途径。

3 光声法的发展及主要应用

3.1 声探测技术的基本情况

光声技术最早可以追溯到 1880 年贝尔发现的光声现象。随着激光的出现,激光成为激发超声波的有力工具。光声效应是指当物质受到脉冲激光辐照时,物质因吸收光能而受到激发。受激原子或分子被激发到高能级,在经过一定的寿命之后,原子或分子跃迁回基态,产生热能,而这些热能引起物体局部温度随激光脉冲而发生同步的周期性变化,引起物体及其相邻区域发生热胀冷缩而产生应力,应力的周期性变化产生了声信号,即光声信号。光声信号在物体表面传播时表现出的特性与物体表面性质相关,因此可以利用光声现象来对元件表面上的光学薄膜进行表征。

光声法测试薄膜器件的基本原理如图 9、图 10 所示。激光照射到薄膜器件表面,产生声信号。在单纯的基底上,光致表面声波是色散极小的,即传播过程中声波频率近似一致。然而由于光学薄膜和基底的弹性性质不同,使光致表面声波在光学薄膜中传播时发生了变频色散。将声信号进行傅里叶变换,就可以拟合得到声信号传播的色散曲线,从而拟合出含有薄膜密度、厚度、弹性模量等参数的结果。

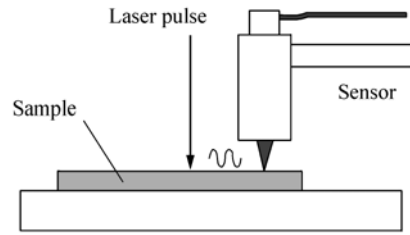


图 9 激光诱导光声测试法基本原理

Fig. 9 Principle of laser photoacoustic technique

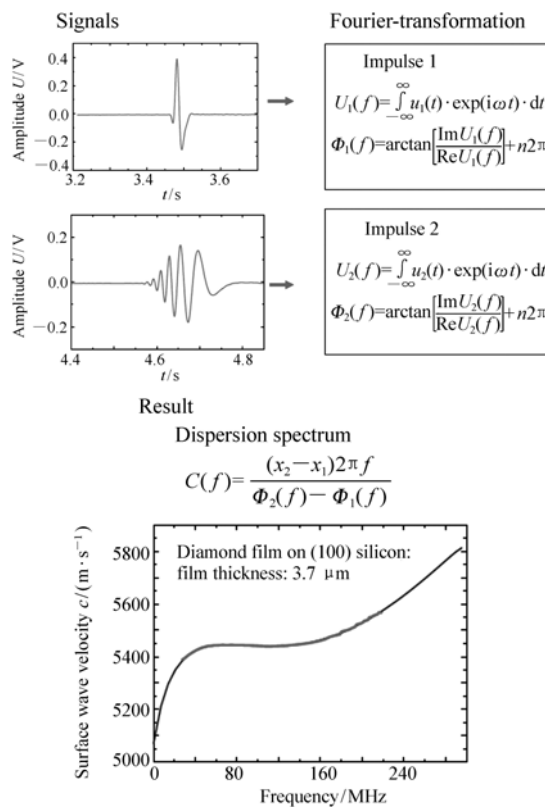


图 10 光声信号的转换和拟合

Fig. 10 Transformation and fitting of optical-acoustics signals

众所周知,声波在物体中传播时,存在衰减现象。当声波频率较低时,声波的衰减较小,穿透性能较好。当声波频率升高时,衰减上升,穿透性能较弱,传播主要集中在物体表面。因此,为了探测薄膜器件,可以提高探测声波的频率,声波的传播性质就基本由器件表面,也就是薄膜来决定。这样,就可以利用激光诱导高频声波,对光学薄膜的杨氏模量^[38]、残余应力^[39]以及缺陷^[40]和吸收^[41]

等参数进行检测。

3.2 光声探测技术在薄膜表征中的应用

3.2.1 光学薄膜吸收测试

目前利用光声法检测薄膜吸收的方法主要有两类:第一类^[11]将待测薄膜器件安装到密封光声池内的样品架上,令周期性的入射光照射到样品上。样品对入射光产生吸收后,温度升高发生热变形,或者是温度升高引起光声池内的气体发生热膨胀。这两种效应会共同导致光声池内的气压随着周期性的入射光而发生周期性的变化,产生声信号。再利用灵敏的声音探测器和放大器接收、处理信号,就可以测量薄膜器件的吸收。第二类将压电类传感器直接连接在样品上,周期性入射的激光引起样品周期性形变,同样会激发声波,传播到压电类传感器上即可产生电信号。将电信号进行处理,然后与已标定的样品进行对比,即可测得光学薄膜的吸收。两类方法比较,前者的优点是可以进行无接触式测量,但是需要专门的样品池。后者则在实验装置上要简便很多。

然而,光声信号在光学薄膜中的传播机理也非常复杂,受到诸如薄膜材料、层数、基板性质等诸多因素的影响,标定也很困难。因此,光声方法目前更适用于相对测量,并没有成为测量短波光学薄膜吸收绝对值的主要方法。而在吸收较为微弱的红外波段,已有利用此类方法对光学薄膜的吸收进行了测试的报道^[41]。

3.2.2 薄膜杨氏模量检测

在对包括薄膜在内的材料的力学表征中,杨氏模量是一项重要的参数。光声法的特殊原理决定了这种方法非常适用于薄膜材料杨氏模量的非破坏性测试。

通过测量表面声波在光学薄膜器件中传播的色散曲线,在已知薄膜材料厚度的情况下,就可以同时拟合得到光学薄膜的杨氏模量和密度。目前已有大量关于此方面的研究^[42-43],如徐晓东等人利用光差分技术检测基底表面薄膜的杨氏模量^[44],金宝印等人利用光偏转表面声波方法测量薄膜的杨氏模量^[45]等。图 11 为采用 Lawave 表面声波检测方法获得的、在深紫外光刻系统^[46-47]中经常使用的不同工艺的典型氟化物薄膜的杨氏

模量检测结果,其中热蒸发方法制备的 LaF₃ 杨氏模量约为 75 GPa, MgF₂ 杨氏模量约为 140 GPa,均与其体材料数值相当,说明薄膜为理想的致密结构。

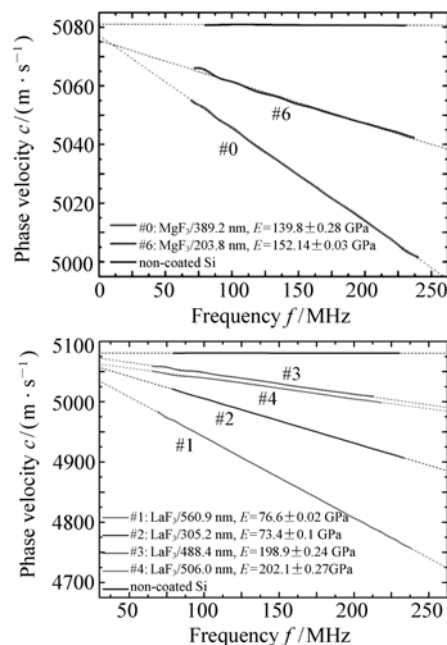


图 11 深紫外薄膜杨氏模量测试

Fig. 11 Measurement of DUV thin film's Young's modulus

光声法的应用不仅限于此,还可扩展到一些其它应用,比如某些特殊的软性薄膜材料的杨氏模量测试。由于传统的接触式弹性测试方法只能测试杨氏模量较大的硬质材料。但如果薄膜材料很软,采用传统压痕测试方法,得到的载荷-位移曲线就会偏离正常的形状。随着光学薄膜的发展,出现了许多柔性功能薄膜。对它们进行杨氏模量测试成为了难题。光声探测法则可以满足这样的测试需求。由于光声法采取非接触式测量,所以即使薄膜材料很软,激光诱导声波也可以在表面自然传播,并最终被探测器所检测。Juequan 等人利用光声法测试了极紫外波段工作的柔性碳薄膜的杨氏模量^[48],Dieter 等人利用光声法测试了柔性聚合物薄膜的杨氏模量^[49],并与传统方法进行了比较,发现利用传统纳米压痕法获得的结果存在不可忽视的误差(图 12)。

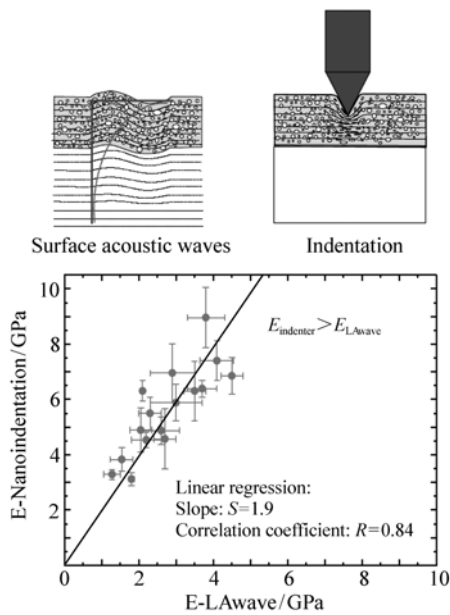


图12 柔性薄膜的杨氏模量检测

Fig. 12 Young's modulus' detection of soft thin film

3.2.3 薄膜残余应力检测

声表面波在无应力的薄膜器件表面传播时,速度分布是均匀的。当薄膜存在残余应力时,声表面波传播速度的二维分布就会相应发生变化。Hirao 等人从声弹性理论出发,给出了表面波的速度相对变化与材料表面的残余应力分布的关系^[50],只要测量出薄膜器件的表面波声速变化的分布,就可以检测出表面残余应力的分布。

随着激光锁模调 Q 等技术的发展,人们已经可以得到纳秒级的短脉冲激光。这种激光很容易诱导出高频的声信号。Doxbeck 等人利用光致声波来测量材料的残余应力^[39]。目前,光声法已成为和 XRD 衍射法、应力双折射法并列的光学薄膜应力常用测量方法。

3.2.4 光学薄膜损伤探测

在光学薄膜发生损伤之后,由于薄膜的微观

结构和应力分布发生变化,在其中传播的声信号的分布也会随之发生较大的改变。因此光声法检测光学薄膜的损伤的一种实用、高效的手段^[40]。

实际应用光声法探测薄膜损伤时,存在一个矛盾。光学薄膜内部发生缺陷时,当波长与缺陷尺度相当的声表面波传播至缺陷附近,声波的传播就会发生明显的变化。然而薄膜缺陷是极其微小的,这样就需要探测声波具有足够高的频率。前文中介绍过,高频率的声波在物体中衰减很快,因此探测的范围很小。而薄膜缺陷的发生位置恰恰是不确定的,探测时需要进行较大范围的探测。A. K. Kromine 和 Y. Sohn^[51-52]等人提出了扫描激光光源方法,解决了这个问题。这种方法的原理是令高频激光源在待测薄膜器件上扫描,当激光源接近薄膜损伤的位置时,固定安置在薄膜器件较远位置的探测器就会接收到差异显著的信号,从而判别薄膜损伤的位置。

4 结束语

近年来,随着光学技术的不断进步,光学系统的成像质量也越来越高。在高精度的光学系统中,光学薄膜的性能更是至关重要,成为了系统性能的关键。随着薄膜的性能逐步提高,与之相匹配的高精度检测技术也随之跨越式发展。光热法和光声法以其新颖的测试原理、极高的检测精度、广泛的应用范围,获得了越来越重要的应用。在传统测试方法难以解决的薄膜吸收、力学性质以及长期环境适应性等方面的检测中,光声法和光热法都拥有出色的表现。相信随着技术的不断进步,光热法和光声法现存的一些缺点和问题也将被逐渐被优化和解决,而且可以利用光热法和光声法进行表征的参数也将与日俱增。光声法和光热法将成为更加强有力的工具,在光学薄膜全方位测试中发挥更大的效力。

参考文献:

- [1] 范正修,魏朝阳. 高功率激光系统中光学薄膜的现状与发展趋势[J]. 激光与光电子学进展, 2009, 7: 14-17.
FAN ZH X, WEI ZH Y. Progress and development trends of optical coatings in high power laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, 7: 14-17. (in Chinese)
- [2] DAVIEST S J, EDWARDS C, TAYLOR G S, et al. . Laser-generation ultrasound: its properties mechanisms and multifarious applications[J]. *Appl. Phys.*, 1993, 26: 329-348.

- [3] ROGERS J A, MAZNEV A A, BANET M J, *et al.*. Optical generation and characterization of acoustic waves in thin films; fundamentals and applications[J]. *Annual Review Materials Science*, 2000, 30:117-157.
- [4] SHEN Z H, ZHANG S Y. Laser-induced displacement fields in a film-substrate system[J]. *Progress Natural Science*, 2001, 11:299-302.
- [5] ZHANG F F, XU W H, HONG Y, *et al.*. Non-destructive characterization of laminated composite films by laser ultrasonic technique[J]. *Analytical Sciences*, 2001, 17:208-211.
- [6] WELSCH E, RISTAU D. Photothermal measurement on optical thin films[J]. *Applied Optics*, 1995, 34(31):7239-7253.
- [7] 陈习权, 祖小涛, 郑万国. 表面热透镜技术测试光学薄膜特性研究[J]. *光学与光电技术*, 2005, 3(1):53-57.
CHEN X Q, ZU X T, ZHENG W G. Application research of STL technique in photoelectric testing of thin film characterization[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2005, 3(1):53-57. (in Chinese)
- [8] 刘鹏程, 沈剑锋, 施柏焯. 透射式光热偏转技术实验装置的建立及应用[J]. *光学仪器*, 2002, 24(4-5):73-77.
LIU P CH, SHEN J F, SHI B X. The experimental setup's establishment and application for transmission photothermal deflection technique[J]. *Optical Instruments*, 2002, 24(4-5):73-77. (in Chinese)
- [9] MANN K, BAYER A, GLOGER J, *et al.*. Photo-thermal measurement of absorption and wave front deformations in fused silica[J]. *SPIE*, 2008, 7132:71321F.
- [10] PINNOW D A, RICH T C. Development of a calorimetric method for making precision optical absorption measurements [J]. *Appl. Opt.*, 1973, 12(5):984-992.
- [11] 唐晋发, 顾培夫, 刘旭, 等. 现代光学薄膜技术[M]. 杭州:浙江大学出版社, 2006.
TANG J F, GU P F, LIU X, *et al.*. *Modern Optical Thin Film Technology* [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006. (in Chinese)
- [12] ARENBERG J W. An error analysis of ISO 11551[J]. *SPIE*, 2000, 3902:324-331.
- [13] MANN K, ECKERT G, GOERLING C, *et al.*. Characterization of DUV and VUV optical components[J]. *SPIE*, 2002, 4691:1742-1752.
- [14] WU Z L, KUO P K, LU Y S, *et al.*. Laser-induced surface thermal lensing for thin film characterizations[J]. *SPIE*, 1996, 2714:294.
- [15] DIJON J E, VAN OOST, PELL C, *et al.* Laser induced absorption at 355nm in silic studied by calorimetry and photothermal deflection[J]. *SPIE*, 1996, 2714:61.
- [16] 范树海, 贺洪波, 邵建达, 等. 表面热透镜薄膜吸收测量灵敏度提高方法[J]. *物理学报*, 2006, 55(2):758-763.
FAN SH H, HE H B, SHAO J D, *et al.*. Method to improve absorption measurement sensitivity of thin films with surface thermal lens technique[J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, 55(2):758-763. (in Chinese)
- [17] 黄祖鑫, 赵建林, 胡晓阳, 等. 光学薄膜弱吸收测试装置参数优化[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(9):1779-1783.
HUANG Z X, ZHAO J L, HU X Y, *et al.*. Parameters optimized for optical thin film weak absorption testing set-up[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(9):1779-1783. (in Chinese)
- [18] 李绪平, 蒋晓东, 郑万国, 等. 透射式光热透镜技术的原理和应用[J]. *光学仪器*, 2008, 30(1):34-39.
LI X P, JIANG X D, ZHENG W G, *et al.*. The principle and application for transmission photo-thermal lens technique [J]. *Optical Instruments*, 2008, 30(1):34-39. (in Chinese)
- [19] BOCCARA C, FOURNIER D. Thermo-optical spectroscopy: detection by the "mirage effect" [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1979(36):130.
- [20] M HLG C, BUBLITZ S, PAA W. Laser Induced Deflection (LID) method for absolute absorption measurements of optical materials and thin films[J]. *SPIE*, 2011, 8082:808225.
- [21] M HLG CH., TRIEBEL W, KUFERT S, *et al.*. Characterization of low losses in optical thin films and Materials[J]. *Appl. Opt.*, 2008, 47:135-142.
- [22] 邵庆. 用光热偏转法研究光学薄膜的弱吸收特性[D]. 杭州:浙江大学, 1992.
SHAO Q. Study on optical thin film weak absorption by photothermal deflection technique[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 1992. (in Chinese)

- [23] STARKE K, JUPE M, RISTAU D, *et al.* . Non-linear absorptance of optical parametric amplified ultrashort pulses in dielectric coating materials[J]. *SPIE*, 2005, 5647:524.
- [24] BLASCHKE H, RISTAU D, WELSCH E, *et al.* . Absolute Measurements of non-linear Absorption near LIDT at 193 nm [J]. *SPIE*, 2001, 4347:447.
- [25] APEL O, MANN K, MAROWSKY G. Nonlinear thickness dependence of two-photon absorptance in Al₂O₃ films[J]. *Applied Physics*, 2000, A71:593-596.
- [26] APEL O, MANN K, ZOELLER A, *et al.* . Nonlinear absorption of thin Al₂O₃ films at 193 nm[J]. *Applied Optics*, 2000, 39(18):3165-3169.
- [27] LIU W J, LI B CH. Repetition rate dependence of absorption of fused silica irradiated at 193 nm[J]. *COL*, 2013, 11(5):053002.
- [28] NATURA U, MARTIN R, VON DER G G, *et al.* . Kinetics of laser induced changes of characteristic optical properties in lithosil with 193 nm excimer laser exposure[J]. *SPIE*, 2005, 5754:1312-1319.
- [29] BALASA I, BLASCHKE H, JENSEN L, *et al.* . Impact of SiO₂ and CaF₂ surface composition on the absolute absorption at 193 nm[J]. *SPIE*, 2011, 8190:81901T.
- [30] MUHLIG CH, KUFERT S, TRIEBEL W, *et al.* . Simultaneous measurement of bulk absorption and fluorescence in fused silica upon ArFlaer irradiation[J]. *SPIE*, 2002, 4779:107-116.
- [31] STEWART A F, GUENTHER A H. Laser damage test results on Blazers round-robin thin film samples[J]. *Appl. Opt.*, 1984, 23(21):3774-3778.
- [32] FOLTYN S R. Spot size effects in laser damage testing[J]. *Spec. Publ.*, 1984, 669:368-379.
- [33] BENNETT H E, GLASS A J, GUENTHER A H, *et al.* . Laser induced damage in optical materials; eleventh ASTM symposium[J]. *Appl. Opt.*, 1980, 19(14):2375-2375.
- [34] 黄伟, 张云洞. 连续波强激光辐照下光学薄膜元件损伤机理和热畸变研究[J]. *光学精密工程*, 1996, 4(5):61-66.
- HUANG W, ZHANG Y D. Study of the damage mechanism and thermal distortion of optical coating components under CW high power laser radiation[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1996, 4(5):61-66. (in Chinese)
- [35] 徐俊海, 赵元安, 邵建达, 等. 不同工艺条件下 TiO₂ 单层膜的吸收和损伤阈值测试[J]. *中国激光*, 2012, 39(4):0407001-1-5.
- XU J H, ZHAO Y A, SHAO J D, *et al.* . Absorption and laser induced damage threshold of TiO₂ single films under different process conditions[J]. *Chinese J. Laser*, 2012, 39(4):0407001-1-5. (in Chinese)
- [36] 赵灵, 武潇野, 谷永强, 等. 激光量热法测量深紫外氟化物薄膜吸收[J]. *中国激光*, 2014, 已收录.
- ZHAO L, WU X Y, GU Y Q, *et al.* . Measuring the absorptance of DUV fluoride coatings with Laser Calorimetry[J]. *Chinese J. Laser*, 2014, received.
- [37] ZHANG L CH, CAI X K. High performance fluoride optical coatings for DUV optics[J]. *SPIE*, 2014, received.
- [38] BERGER L M, SCHNEIDER D, BARBOSA M, *et al.* . Laser acoustic surface waves for the non-destructive characterisation of thermally sprayed coatings[J]. *Thermal Spray Bulletin*, 2012, 1:56-64.
- [39] DOXBECK M, HUSSAIN M A, FRANKEL J. Use of laser generated creeping longitudinal waves to determine residual stresses[J]. *IEEE Ultrasonics Symposium*, 2000:725-728.
- [40] 丁毅. 激光薄膜损伤的声学判别方法研究[D]. 西安:西安工业大学, 2012.
- DING Y. Study on Acoustic identification method of laser damage in thin films[D]. Xi'an:Xi'an Technological University, 2012. (in Chinese)
- [41] 林悦波. 激光声学法测量红外光窗材料吸收系数的研究[J]. *激光杂志*, 1996, 17(4):177-184.
- LIN Y B. Research on measuring the coefficients of infrared window material by laser photoacoustic technique[J]. *Laser J.*, 1996, 17(4):177-184. (in Chinese)
- [42] KHAN A, PHILIP J, HESS P. Young's modulus of silicon nitride used in scanning force microscope cantilevers[J]. *Applied Physics*, 2004, 95(4):1667-1672.
- [43] JIANG X, PHILIP J, ZHANG W J, *et al.* . Hardness and Young's modulus of high-quality cubic boron nitride films grown

- by chemical vapor deposition[J]. *Applied Physics*, 2003, 93(3):1515-1519.
- [44] 徐晓东,张淑仪,张飞飞,等. 利用光差分技术检测激光激发声表面波验证薄膜材料[J]. *声学学报*, 2003, 28(3):201-206.
XU X D, ZHANG SH Y, ZHANG F F, *et al.*. Characterizing of thin film materials by optical difference detection of laser generated SAW[J]. *Acta Acustica*, 2003, 28(3):201-206. (in Chinese)
- [45] 金宝引. 激光声表面波系统及其在薄膜杨氏模量测量中的应用研究[D]. 天津:天津大学, 2011.
JIN B Y. Study on the measurement of thin film's Young's modulus using LG/LD surface acoustic waves[D]. Tianjin: Tianjin University, 2011. (in Chinese)
- [46] 巩岩,张巍. 193 nm 光刻曝光系统的现状及发展[J]. *中国光学与应用光学*, 2008, 1(1):25-35.
GONG Y, ZHANG W. Present status and progress in 193 nm exposure system in lithography[J]. *Chinese J. Optics and Applied Optics*, 2008, 1(1):25-35. (in Chinese)
- [47] 张立超,高劲松. 长春光机所深紫外光学薄膜技术研究进展[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(11):2396-2401.
ZHANG L CH, GAO J S. Developments of DUV coating technologies in CIOMP[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(11):2396-2401. (in Chinese)
- [48] CHEN J Q, LEE C J, LOUIS E, *et al.*. Characterization of EUV induced carbon films using laser-generated surface acoustic waves[J]. *Diamond & Related Materials*, 2009, 18:768-771.
- [49] SCHNEIDER D, SCHWARZ T. A photoacoustic method for characterizing thin films[J]. *Surface and Coatings Technology*, 1997, 91:136-146.
- [50] HIRAO M, FUKUOKA H, HORI K. Acoustoclastic effect of Rayleigh surface wave in isotropic materials[J]. *Applied Mechanics*, 1981(48):119-124.
- [51] KROMINE A K, FOMITCHOV P A, KRISHNASWAMY S, *et al.*. Applications of scanning laser source technique for detection of surface-breaking defects[J]. *SPIE*, 2000, 4076:252-259.
- [52] SOHN Y, KRISHNASWAMY S. Mass spring lattice modeling of the scanning laser source technique[J]. *Ultrasonics*, 2002, 39(8):543-551.

作者简介:



武潇野(1988—),男,内蒙古兴安盟人,硕士,研究实习员,2010年、2012年于北京理工大学分别获得学士、硕士学位,主要从事深紫外薄膜方面的研究。E-mail:wxy19881107@163.com



时光(1985—),女,黑龙江鸡西人,硕士,助理研究员,2008年、2011年于电子科技大学分别获得学士、硕士学位,主要从深紫外薄膜方面的研究。E-mail:mrconnie@163.com



张立超(1979—),男,吉林省吉林市人,博士,副研究员,2000年、2003年于吉林大学分别获得学士、硕士学位,2007年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事短波光光学薄膜技术方面的研究。E-mail:zhanglc@sklao.ac.cn