

文章编号: 0258-7025(2009)02-0467-05

表面热透镜与光热失调技术测量 光学薄膜吸收的灵敏度比较

郝宏刚^{1,2} 李斌成¹ 刘明强^{1,2}

(¹ 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209; ² 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要 在理论分析优化的基础上,以 BK7 玻璃和石英为基底的高反射光学薄膜为样品,采用强度调制的连续激光作为激励光源,实验研究了表面热透镜(STL)技术和光热失调(PTDT)技术的信号幅值随激励光调制频率的变化关系,分析比较了这两种方法在测量光学薄膜吸收损耗方面的灵敏度。实验表明,光热失调技术具有构型优化简单、实验操作难度低和测量空间分辨率高等优点,对于具有较高反射率温度系数的高反射膜等样品,采用光热失调技术有利于提高薄膜吸收损耗测量的灵敏度。实验结果与理论分析基本一致。

关键词 测量;微弱吸收;表面热透镜;光热失调

中图分类号 O432.2 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093602.0467

Sensitivity Comparison for Absorption Measurement of Optical Coatings between Surface Thermal Lens and Photothermal Detuning Techniques

Hao Honggang^{1,2} Li Bincheng¹ Liu Mingqiang^{1,2}

(¹ Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;
² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract Based on the theoretical configuration optimization, surface thermal lens (STL) and photothermal detuning (PTDT) experiments with a continuous-wave modulated laser beam excitation are performed with highly reflective films coated on BK7 and fused silica substrates. The amplitudes of STL and PTDT signals as a function of the modulation frequency are experimentally measured. The sensitivities of STL and PTDT in measuring the weak absorbance of optical coatings are compared. Compared with STL technique, the PTDT technique is experimentally simple and has a higher spatial resolution for absorption mapping of optical coatings, while maintaining the high measurement sensitivity. The experimental results show that for samples with a large temperature coefficient of reflectivity, the PTDT technique can obtain high measurement sensitivity. Agreement is obtained between the experimental results and the theoretical predictions.

Key words measurement; weak absorbance; surface thermal lens; photothermal detuning

1 引言

近年来,随着激光技术的发展和高功率激光的广泛应用,对高功率激光薄膜的需求不断增长,同时也给光学薄膜的发展带来了新的挑战,薄膜元件光学性能的改善是提高高功率激光系统整体性能的关键之一。吸收损耗是影响光学薄膜性能的重要参

量,吸收损耗的存在降低了光学薄膜元件的损伤阈值,限制了激光系统的传输功率和光束质量。目前,高质量的光学薄膜的吸收损耗已降到 10^{-6} 甚至更低,传统的分光光度法和消光系数法已无法满足测量要求。表面热透镜(STL)技术是近年发展起来的一种基于光热效应的测量方法。由于具有很高的测

收稿日期:2008-04-22; 收到修改稿日期:2008-05-28

作者简介:郝宏刚(1977—),男,山东人,博士研究生,主要从事光热检测技术方面的研究。

E-mail: haoluo1213@126.com

导师简介:李斌成(1966—),男,湖北人,研究员,博士生导师,主要从事光热技术和光学薄膜检测技术方面的研究。

E-mail: bcli@ioe.ac.cn

量灵敏度,在光学薄膜吸收测量领域已得到了广泛应用^[1~4]。最近,Honggang Hao等^[5]提出一种测量光学薄膜吸收损耗的新方法-光热失调法(PTDT),具有实验构型简单、灵敏度高优点,并实验验证了该方法测量光学薄膜微弱吸收的可行性。这两种方法基于不同的光热效应,具有不同的测试构型,可以用于光学薄膜的吸收测量。本文在理论优化两种测量技术实验构型的基础上分析比较了两种方法测量光学薄膜吸收损耗的灵敏度,讨论了光热失调技术的优点和缺点,并以BK7玻璃和石英为基底的532 nm波段高反射膜元件为样品,采

用强度调制波长532 nm连续激光为激励光源,波长632.8 nm激光为探测光源进行了光热失调实验研究,并和表面热透镜技术进行了比较。

2 基本原理

强度调制的激励激光束会聚入射到薄膜样品表面,薄膜吸收部分激光能量转变为热能引起薄膜系统温度上升,温度的变化引起一系列光热效应形成了各种各样的光热测量技术,其中包括表面热透镜技术和光热失调技术。

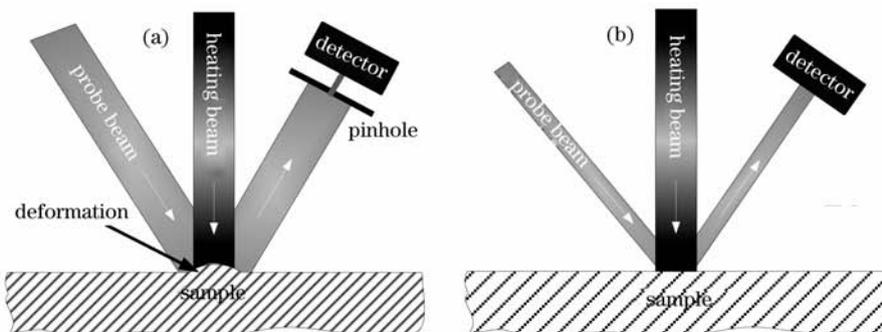


图1 表面热透镜技术原理图(a)和光热失调技术原理图(b)

Fig. 1 Principle of surface thermal lens technique (a) and photothermal detuning technique(b)

表面热透镜技术的原理如图1(a)所示。温升导致样品表面热膨胀形成“表面热包”,被称为“光热形变”。一束探测激光束(样品表面探测光斑大于激励光斑)近乎垂直地照射到热包表面上,热包位于探测光斑的中心且小于探测光斑。受热包的影响,反射探测激光束将产生衍射现象,其中心强度变化最大,这种现象被称为“表面热透镜效应”。菲涅耳衍射理论成功地应用到表面热透镜技术中^[6~8]取得了较好的结果。实验结果表明,在一定条件下,反射探测激光束中心光强随热包高度的变化呈线性变化,而热包的高度与薄膜的吸收率成正比,因此表面热透镜技术可用于测量薄膜吸收,其信号定义为^[6]

$$S_1 = \frac{I_2(\Delta\varphi) - I_2(\Delta\varphi = 0)}{I_2(\Delta\varphi = 0)}, \quad (1)$$

式中 I_2 为接收面上反射探测光的强度分布, $\Delta\varphi(x, y, t) = \frac{2\pi}{\lambda} 2h(x, y, t)$, $\Delta\varphi$ 为由样品表面形变带来的附加相位, $h(x, y, t)$ 为样品表面的光热形变^[5], λ 为探测光波长。由于在接收面上反射光中心的强度变化最大,所以在表面热透镜技术中通常采用在探测器前加小孔测量探测光中心强度变化的构型测量表面热透镜信号。

光热失调技术的原理如图1(b)所示,受温度变化的影响,薄膜系统的反射光谱带发生漂移,特定波长下的反射率会发生改变,其中在光谱带边缘斜率较大的波长范围反射率变化最大。选择合适波长和入射角的探测激光束照射在温度变化区域,其反射或透射光的强度发生变化。在一定条件下,反射或透射光强度的变化随温度变化呈线性变化,而薄膜系统的温升与薄膜的吸收率成正比,与表面热透镜技术一样,光热失调技术也可以用于测量薄膜吸收,其信号定义为^[5]

$$S_2 = \frac{1}{R_0} \frac{dR}{dT} \Delta T(x, y, t), \quad (2)$$

式中 R_0 和 dR/dT 分别为初始温度为 T_0 时薄膜元件在探测波长的反射率和反射率温度系数, $\Delta T(x, y, t)$ 为薄膜样品薄膜层内温度分布^[5]。与表面热透镜技术不同,光热失调技术测量的是全部反射或透射探测光强度的变化,所以测量时不需小孔或狭缝等装置。

3 实验构型优化

假设实验采用532 nm波段高反射光学薄膜样

品,其结构为[Air/(HL)¹⁰H/Sub]的四分之一波长堆,采用电子束蒸发的方式镀制,高折射率材料为TiO₂,低折射率材料为SiO₂,衬底为熔融石英和BK7玻璃,厚度分别为2.5 mm和2.0 mm,对532 nm光波的反射率在98%以上。理论分析中,探测光波长为632.8 nm,样品表面加热光斑大小为0.2 mm,探测光斑半径在STL中为1.2 mm,而在PTDT中则假设为零。激励光功率和样品对激励光的吸收率分别取为3 W和 1×10^{-4} 。石英和BK7玻璃的热膨胀系数分别为 $5.5 \times 10^{-7}/\text{K}$ 和 $7.5 \times 10^{-6}/\text{K}$ ^[5]。

3.1. 表面热透镜技术中探测距离的选择

图2为相同条件下BK7玻璃和石英基底样品的表面形变径向分布情况,可见由于两种基底的热膨胀系数不同,在相同激光束照射条件下表面产生的光热形变差别较大,BK7基底样品表面产生的光热形变要大于石英基底样品的形变。相对而言,石英基底的样品采用表面热透镜技术不利于光学薄膜吸收损耗的测量。

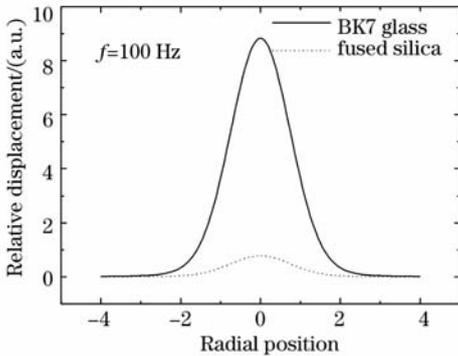


图2 BK7玻璃和石英基底样品表面形变的径向分布
Fig.2 Radial distributions of photothermal deformation of BK7 and fused silica substrate samples

表面热透镜信号除了与样品热物理参数有关外,还与实验测试构型有关,其中包括样品表面探测光斑和加热光斑的大小关系和相对位置以及探测距离(样品到探测器的距离)等^[9,10]。理论和实验分析表明,当探测光斑比加热光斑大5倍以上时,两光斑的大小关系对信号的影响变得很小;同时两光斑在样品表面重合时信号最大。热透镜信号与探测距离的关系较为复杂,理论和实验证明近场探测时存在一个最佳探测距离^[6,7]。图3所示为最佳探测距离随调制频率的变化关系,可见随着调制频率的增加最佳探测距离不断减小,最后达到一个稳定值。BK7玻璃和石英基底样品在高频区域最佳探测距离相差不大。

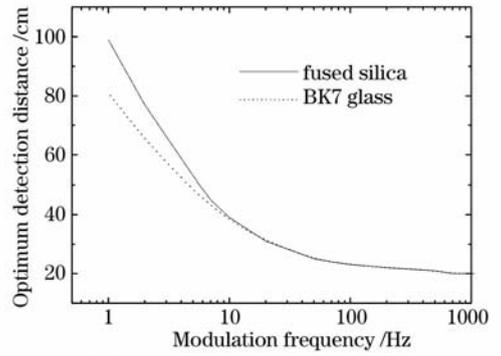


图3 STL信号最佳探测距离随调制频率的变化情况
Fig.3 Optimum detection distance versus modulation frequency for STL technique

3.2. 光热失调技术中探测光入射角度的选择

光热失调信号幅值则与测试条件下样品的反射率温度系数有直接关系,反射率温度系数越大,信号越大,测量的灵敏度越高,选择合适的探测光波长和入射角以增大反射率温度系数对测量灵敏度的提高具有重要意义。对于描述的实验样品,分析表明可以用波长为632.8 nm的激光作为探测光,通过调整探测光的入射角达到优化测量灵敏度。如图4所示为反射率温度系数随探测光束入射角的变化。根据理论分析^[5],由图4可见所用的探测波长存在一个最佳入射角 28° ,在该角度时反射率温度系数最大,光热失调技术测量吸收的灵敏度最高。另外由于反射率温度系数与基底热膨胀系数有关,BK7玻璃(热膨胀系数大)和石英(热膨胀系数小)基底样品在最佳角度时的反射率温度系数不同,分别为 $1.14 \times 10^{-3}/\text{K}$ 和 $1.41 \times 10^{-3}/\text{K}$,如图5所示。与表面热透镜技术相比,对石英基底样品要用光热失调技术反而有利于提高光学薄膜吸收损耗测量的灵敏度。

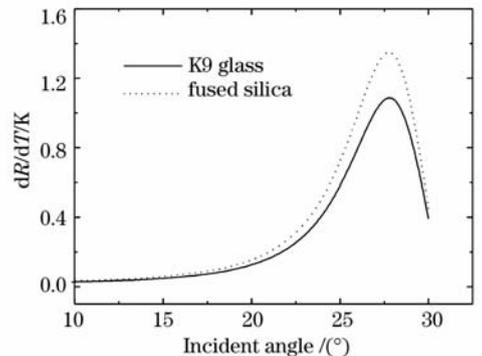


图4 反射率温度系数随探测光束入射角的变化情况
Fig.4 Temperature coefficient of reflectivity versus incident angle of the probe beam

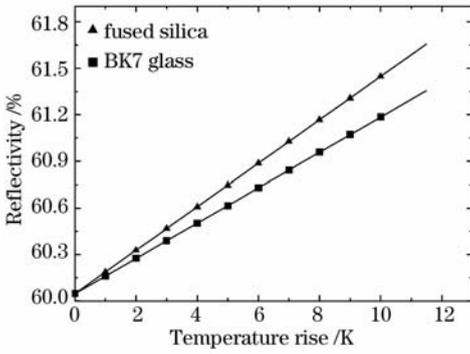


图5 BK7玻璃和石英基底样品的反射率温度系数
Fig. 5 Temperature coefficient of reflectivity of coated BK7 and fused silica samples

4 实验装置

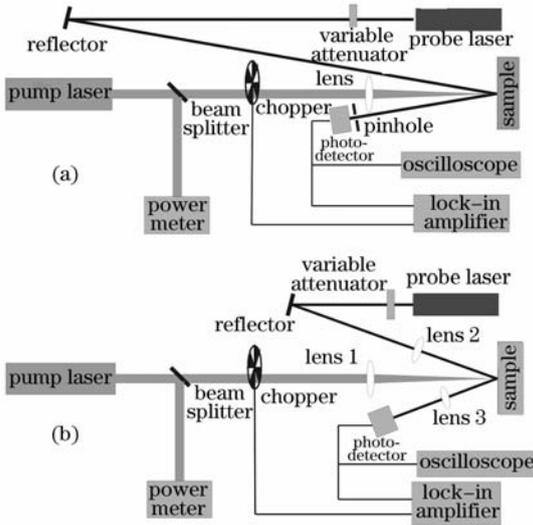


图6 实验装置示意图

(a) 表面热透镜技术 ;(b) 光热失调技术

Fig. 6 Experimental setup of STL technique (a) and PTDT (b)

图6(a),(b)分别为表面热透镜技术和光热失调技术实验装置图。激励光束由连续激光器(Verdi-V5 Coherent)提供,输出波长为532 nm,功率在0~5 W内连续可调,并用功率计监测其功率。激励光经机械斩波器(SR540 Stanford Research Systems)强度调制后又经透镜(焦距180 mm)聚焦照射在光学薄膜样品上,在样品表面的光斑大小约为0.2 mm。探测光束由氦氖激光器(05-STP-903 Melles Griot)提供,工作波长632.8 nm,输出功率约为1 mW。在表面热透镜技术中,探测光以几乎垂直的角度照射到薄膜面上,在样品表面的光斑大小约为1.2 mm,将探测器(DET36A Thorlabs)

放在最佳探测距离(实验测量时为20 cm)处并在其前加一直径为0.15 mm的小孔(P150s Thorlabs)监测反射光束中心光强的变化。在光热失调技术中,探测光经透镜(焦距120 mm)聚焦后以最佳的入射角(实验测量时为28°)照射到加热光照射区域,光斑大小约为0.03 mm,其反射光经透镜(焦距70 mm)聚集到光电探测器(DET36A Thorlabs)的接收面上。光电探测器的输出信号由锁相放大器(SR830 Stanford Research Systems)和数字存储示波器(TDS2012 Tektronix)直接读出和记录。

表面热透镜技术与光热失调技术相比,虽然降低了实际操作的难度,但由于表面热透镜技术测量的是反射光束中心光强的变化,且最优信号与探测距离、两光斑相对大小以及位置等多个实验参量有关,不易获得一个最佳信号,实验调试比较复杂。而光热失调技术中,由于测量的是全部反射或透射光强的变化,最优信号仅与探测光的入射角等有关,实验调试变得非常简单。

5 结果与讨论

由理论分析可知,表面热透镜技术与材料热膨胀系数成正比,而光热失调技术则与薄膜系统的反射率温度系数成正比。对于热膨胀系数和反射率温度系数不同的样品,采用不同的测量手段测量灵敏度也因此不同。

图7(a),(b)分别为表面热透镜技术和光热失调技术测量BK7玻璃和石英为基底的两种样品的最优信号幅值随调制频率的变化情况。与其他光热方法一样,表面热透镜技术和光热失调技术的幅频响应在低频段信号幅值随调制频率增加变化较慢,在高频段随频率增加变化较快。表面热透镜信号幅值在高频段与频率成线性反比变化,而光热失调信号幅值与频率的平方根成线性反比变化,相比较在高频段光热失调技术信号幅值随频率变化减小较慢。对于BK7玻璃基底的样品,由于基底热膨胀系数较大,薄膜系统的反射率温度系数较小,表面热透镜信号比光热失调技术信号大,但随频率的升高,由于表面热透镜信号下降快,光热失调信号下降慢,在高频区域光热失调信号有高于表面热透镜信号的趋势。

对于石英基底样品,基底材料的热膨胀系数较小,而薄膜系统的反射率温度系数相对较大,光热失调信号比表面热透镜信号大。由于两种光热信号随调制频率的变化趋势不同,随着调制频率的升高,这

种差别也越来越大。另外,由于实验中光斑大小和系统响应的测量以及样品表面探测光斑与激励光斑相对位置等因素的影响使得理论与实验存在一些偏差。但总体而言,实验结果和理论计算基本符合。

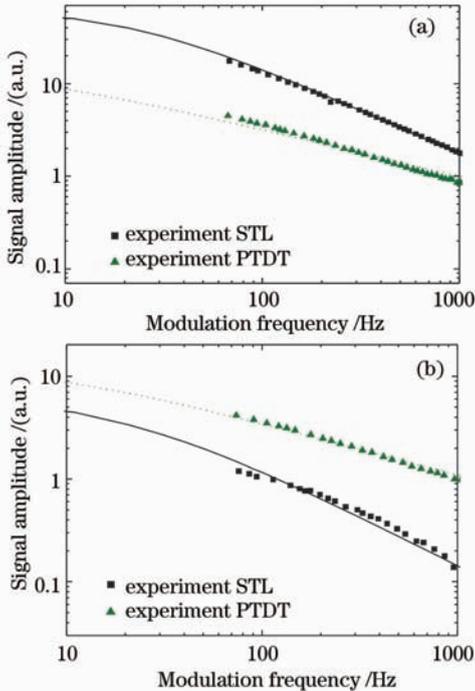


图 7 STL 和 PTDT 信号幅值随调制频率的变化情况
(a)BK7 玻璃基底样品;(b)石英基底样品

Fig. 7 STL and PTDT signal amplitudes versus modulation frequency. (a) film coated on BK7 substrate;(b)film coated on fused silica substrate

比较图 7(a),(b)可见,对于基底材料热膨胀系数较小的高反射光学薄膜,不适合采用表面热透镜技术测量薄膜吸收,采用光热失调技术则有利于提高测量的灵敏度。在绝对吸收测量方面,光热失调技术必须采用相同结构和光谱性质的薄膜样品为定标样品进行定标,对定标样品要求更为苛刻,比传统的光热技术更困难,不易实现绝对吸收的测量,适用于光热成像和相对测量。另外,表面热透镜信号易受到光束偏转的影响。需要指出的是,光热失调技术的灵敏度与薄膜材料的光学、热学性质和膜系结构、层数等也有很大的关系。光热失调技术的最大局限性是仅适用于具有较大的反射率温度系数的样品,特别是测量样品需具备边沿较陡的反射或透射光谱带,比如高反射膜、滤光片等。

6 结 论

以BK7玻璃和石英基底的532nm波段高反射

光学薄膜元件为样品,实验研究了表面热透镜技术和光热失调技术测量光学薄膜吸收损耗的灵敏度。由理论分析和实验结果可知,对于BK7玻璃基底样品,在低频区域采用表面热透镜技术可获得比光热失调技术高的灵敏度,在高频区域后者的灵敏度逐渐提高;对于石英基底样品,采用光热失调技术可获得更高的灵敏度。表面热透镜技术构型优化对光斑尺寸有一定要求(探测光斑尺寸要大于加热光斑尺寸),而光热失调技术则对光斑尺寸没有要求,可以将两光束都聚焦到微米量级,有利于提高吸收损耗测量的空间分辨率。

参 考 文 献

- 1 Bo Ling, Hongbo He, Jianda Shao. Effects of water vapor in high vacuum chamber on the properties of HfO_2 films[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(8): 487~489
- 2 Hu Haiyang, Fan Zhengxiu, Zhao Qiang. Measuring weak absorbance of thin film coatings by surface thermal lensing technique[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(2): 150~154
胡海洋, 范正修, 赵强. 表面热透镜技术探测光学薄膜的微弱吸收[J]. *光学学报*, 2001, **21**(2): 150~154
- 3 Wang Yingjian, Hu Haiyang, Li Qingguo *et al.*. Study of weak absorption of the thin films coated on the Si plates[J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(10): 937~940
王英剑, 胡海洋, 李庆国等. 高反射硅镜弱吸收的研究[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(10): 937~940
- 4 Li Bincheng. Pulsed thermal lens technique with a non-Gaussian beam excitation[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(7): 945~948
李斌成. 非高斯光束脉冲热透镜技术[J]. *中国激光*, 2006, **33**(7): 945~948
- 5 Honggang Hao, Bincheng Li. Photothermal detuning for absorption measurement of optical coatings[J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(2): 188~194.
- 6 B. Li, S. Xiong, Y. Zhang. Fresnel diffraction model for mode-mismatched thermal lens with top-hat beam excitation [J]. *Appl. Phys. B*, 2005, **80**: 527~534
- 7 Bincheng Li, Eberhard Welsch. Probe-beam diffraction in a pulsed top-hat beam thermal lens with a mode-mismatched configuration[J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(24), 5241~5249
- 8 Fan Shuhai, He Hongbo, Fan Zhengxiu *et al.*. Theory and experiment of surface thermal lens technique used in absorption measurement of thin films[J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(12): 5774~5777
范树海, 贺洪波, 范正修等. 表面热透镜技术应用于薄膜微弱吸收测量的理论和实验[J]. *物理学报*, 2005, **54**(12): 5774~5777.
- 9 Yi Hengyu. Parameters optimization of common path system for surface thermal lensing detection in weak absorption [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(1): 91~96
易亨瑜. 弱吸收测量中共光路表面热透镜系统的参量优化[J]. *中国激光*, 2006, **33**(1): 91~96
- 10 Fan Shuhai, He Hongbo, Shao Jianda *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
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