

文章编号: 0253-2239(2001)02-150-05

表面热透镜技术探测光学薄膜的微弱吸收

胡海洋 范正修

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

赵 强

(Eastern Michigan University, Ypsilanti, MI 48197, USA)

摘要: 对表面热透镜技术测量光学薄膜的微弱吸收进行了理论分析, 并以此建立了薄膜微弱吸收测量实验装置, 对几种典型薄膜的吸收进行了测试, 证实了这种方法的可行性。

关键词: 表面热透镜技术; 热偏转技术; 薄膜; 弱吸收

中图分类号: O432.2 文献标识码: A

1 引 言

光学薄膜吸收损耗的存在, 不仅影响薄膜的光学质量, 更会造成激光在薄膜内的热沉积。特别是在高功率激光作用下, 即使十分微弱的吸收也足以导致薄膜元件的灾难性破坏。导致破坏的吸收可能来自于薄膜的本征吸收, 更大程度是来源于薄膜中的杂质、缺陷引起的局部额外强吸收, 因而有必要对薄膜的这种平均吸收及局部吸收进行精确、快速、实时地检测, 从而达到减少薄膜的吸收损耗、制备出高质量的光学薄膜的目的。

光热技术对弱吸收测量具有极高灵敏度和空间分辨率, 为上述测量提供了可能。它通过对材料或表面在光能作用下所产生的热形变、热辐射、热折射等不同效应的探测, 了解材料及表面的光热特性和热物特性。在以往的工作中, 利用光热偏转技术测量薄膜的吸收特性已广泛被国内外同行所认可及采用^[1~3], 但是由于光热偏转技术的探测光束的光斑小于抽运光束的光斑^[4], 它的测量结果很大程度上依赖于探测光斑相对于抽运光斑的位置, 所以这种方法尽管有较高的灵敏度, 调节却比较困难, 而且稳定性比较差, 已经越来越不能满足测试手段实用化的要求。为了改变这种情况, 在原有的光热探测理论与实践基础上, 我们采用一种新型热波探测手段——表面热透镜技术, 对原有技术进行了改进: 采用大于抽运光束的高斯形探测光进行测量, 从而提高了稳定性; 并同时研制了 YAG 连续单模激光器, 可

直接对 1.06 μm 高功率激光薄膜的吸收特性进行测量, 为改进高功率激光膜的质量打下必要的基础, 加上 He-Ne 抽运源, Ar^+ 离子抽运源, CO_2 抽运源等, 使得该装置可以进行多波长的光热测量。

本文结合自由空间中传播的非涅耳衍射理论对这种表面热透镜技术进行了理论分析, 它是传统光热偏转法的进一步改进, 具有诸多的优越性以及巨大的应用潜力, 其最终将取代偏转法, 朝实用化、仪器化方向发展。

2 基本原理

传统的反射式光热偏转技术利用一束高度聚焦的激光, 探测被抽运激光加热的样品表面热包区域, 表面热包使探测光的反射发生偏转, 偏转量由四象限探测器测量, 测得信号与样品表面热包的斜率成正比, 如图 1(a) 所示。由此方法测得的信号对抽运光与探测光的相对径向偏移十分敏感, 因而使实验中信号的优化十分困难, 对实验人员的要求很高。

在光热偏转技术基础上, 使用大光斑的探测光照射整个样品表面热包区域, 表面热包使探测光的反射波前产生畸变, 如果将反射光线围绕样品表面作镜像反转, 则反射光可以看成是带有相位畸变的透射光, 该相位畸变由样品表面热包引入, 这样表面热包在虚拟光路中作用如同一个“透镜”, 所以我们称之为“表面热透镜技术”, 如图 1(b) 所示。实验表明, 由于上述特性, 表面热透镜技术使实验中信号的调节、优化得到了巨大的简化, 下面对其进行理论分析。

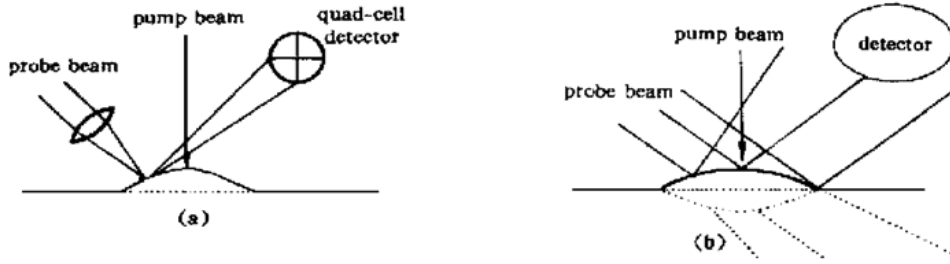


Fig. 1 Schematic depiction of the photothermal deformation detection scheme. (a) Photothermal deflection technique; (b) Surface thermal lensing technique

2.1 理论模型

首先假定抽运激光和探测激光工作在 TEM_{00} 模式, 按理想的高斯强度分布; 其次, 用于加热样品的抽运激光受时间调制; 进一步假设: 抽运激光加热样品引起的表面热包遵循高斯分布, 整个热包区域有均匀的空间相位, 该相位与调制的抽运光保持同步或有固定的相位差。当样品的热扩散长度远小于抽运光光斑时, 这个假设是合理的。因为表面热包区域受限在抽运光高斯分布范围之内, 并与其保持同相或固定的相位差。为此在实验中使用高调制频率调制抽运光从而获得低的热扩散长度, 使用大光斑抽运光, 或综合两种情况。

如图 2 所示, 探测光束腰距样品表面距离 z_1 , 其在样品表面的半径为 w_1 , 相当于或大于抽运光在样品表面的光斑半径 w_0 。我们已经假定入射到样品表面的探测光是高斯分布:

$$E_0(x, y, z_1) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{\exp(-ikz_1)}{w_1} \times \exp\left[-\frac{ik}{2q}(x^2 + y^2)\right], \quad (1)$$

其中 q 为探测光的复半径:

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{R} - \frac{i\lambda}{\pi w_1^2}, \quad (2)$$

式中 R 为探测光的等相位面的半径。

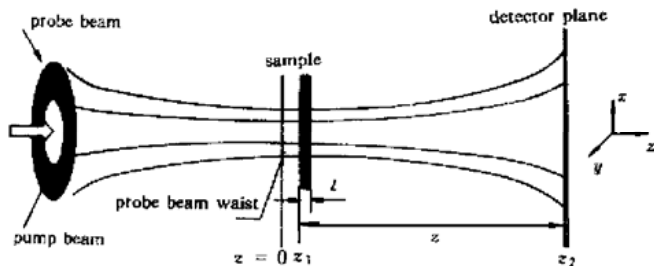


Fig. 2 Illustrative diagram of the surface thermal lensing technique detection scheme

在虚拟光路中, 可以将表面热包看成是“表面热透镜”, 该“透镜”将使探测光的波前发生畸变, 假定其转换函数为 $\exp(ik\Delta h)$, 那么在该“透镜”的输出

平面上探测光的场强为:

$$E_1(x, y, z) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{\exp(-2ik\Delta h)}{w_1} \times \exp\left[-i\frac{k}{2q}(x^2 + y^2)\right], \quad (3)$$

式中 $\Delta h(x, y, t)$ 是表面热包的高度, 可以表示如下:

$$\Delta h(x, y, t) = h(t) \exp\left[-\frac{x^2 + y^2}{w_0^2}\right]. \quad (4)$$

其中 $h(t) = h_0 \cos(\omega t + \theta_h)$, h_0 为振幅, θ_h 为位相, ω 为抽运光的调制角频率。

在探测器平面上的探测光场强和“热透镜”的输出平面上的场强可通过自由空间中传播的菲涅耳衍射公式联系起来, 结合(3)式和(4)式, 可得:

$$E_2(x, y, z, t) = E_1(x, y, z) \otimes \frac{i \exp(-ikz)}{\lambda z} \times \exp\left[-\frac{ik(x^2 + y^2)}{2z}\right] = \frac{i \exp(-ikz)}{\lambda w_1 z} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \iint \exp\left[-\frac{ik(x_0^2 + y_0^2)}{2q}\right] \times \exp\left[-\frac{ik}{2z}[(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2]\right] \times \exp\left[-2ikh(t) \exp\left[-\frac{x_0^2 + y_0^2}{w_0^2}\right]\right] dx_0 dy_0, \quad (5)$$

式中 (x_0, y_0) 为“热透镜”输入平面 z_1 处的横坐标, (x, y, z) 为探测器平面上的坐标。若以泰勒级数将上式积分项展开成 $h(t)$ 的幂级数形式, 上式可简化成:

$$E_2(x, y, z, t) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \times \frac{i \exp\{-ik[z + 2h(t) + (x^2 + y^2)/(2z)]\}}{\lambda w_1 z} \times \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\Lambda^n}{n! \xi^n} \exp\left[-\frac{ik}{8z^2 \xi}(x^2 + y^2)\right], \quad (6)$$

式中:

$$\Lambda = 2ikh(t), \quad \xi = \frac{1}{z} + \frac{1}{q} + \frac{2n}{ikw_0^2}. \quad (7)$$

探测器平面上的探测光强度分布即为(6)式所表示的场强平方的幅值。

2.2 分析与讨论

表面热透镜技术的初衷是加大探测光的光斑,从而使实验中信号的优化、调节得到简化。因此我们对抽运光与探测光的相对大小如何影响探测器平面上的探测光强度分布进行了数值演算,图3是对(2)式~(6)式数值计算(利用Mathematics数值计算软件)得出的在不同参数下的探测器平面上的探测光强度分布曲线,(a)~(c)为两束光半径相对大小 w_1/w_0 的影响,其余参数如下:

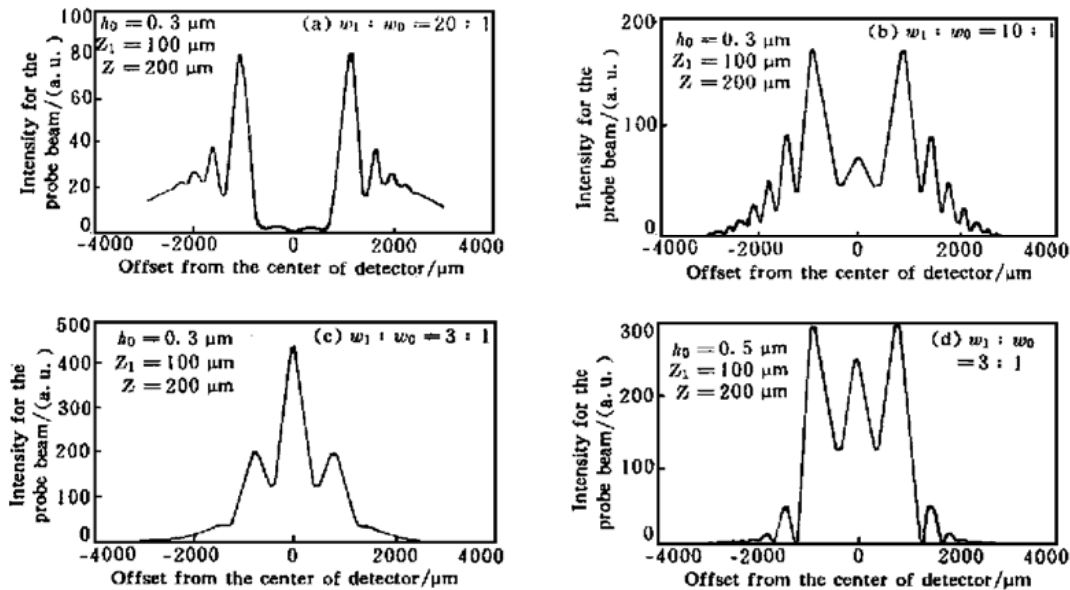


Fig. 3 Calculated results of the probe light distribution on detection plane

图4表示了探测光中心区域的光热信号积分结果随表面热包高度变化的进一步计算分析,从图中可以看到有一段较大的线性区域,由于当样品为弱吸收样品时,表面热包的高度线性依赖于入射的抽运激光能量,这也就从理论上表明表面热透镜技术可以用来测量光学薄膜的弱吸收。

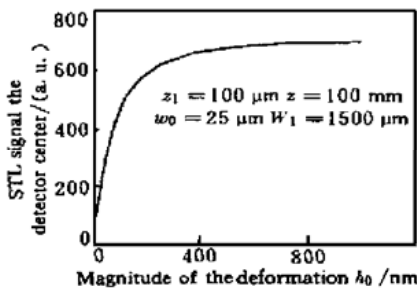


Fig. 4 The curve of thermal signal and thermal deformation

3 装置与实验

根据上述理论,搭建了表面热透镜技术测量弱

$h_0 = 0.3 \mu\text{m}$, $z_1 = 100 \mu\text{m}$, $z = 200 \text{mm}$.

(d)为表面热包的高度 h_0 的影响,其参数同(c),但 $h_0 = 0.5 \mu\text{m}$ 。

比较图3(a)~(c),不难发现抽运光加热样品引起的热透镜使探测光的强度分布偏离了高斯分布,表现出衍射效应,且探测平面中心的信号强弱同抽运光与探测光的相对大小的比值息息相关(一般选择 $w_1/w_0 = 3:1$,此时获得的信号比较强)。同时图3(d)展示了样品表面变形的高度 h_0 的改变对探测光中心强度的影响。

吸收实验装置,如图5所示。为了拓展测量波段,抽运激光可分别采用1064 nm Nd:YAG连续激光和 Ar^+ 离子激光器,实验中最大输出功率均为2 W,输出为线偏振光。抽运光首先被一光学机械调制器(Variable Frequency Dual Reference Light Chopper ND-4)进行振幅调制,产生占空比为50:50的标准方波;然后经过由一对衰减片组成的连续可调的功率调节器;最后经透镜聚焦至样品表面,光斑直径在 $50 \mu\text{m} \sim 70 \mu\text{m}$ 之间可调,通过刀口法测量。探测光为20 mW HeNe激光,波长为632.8 nm。HeNe光由正负透镜组成的透镜对会聚至样品表面(光斑直径在 $300 \mu\text{m} \sim 500 \mu\text{m}$ 之间可调),经样品表面反射后由有一前置狭缝的单象限光电探测器接收,为了防止抽运杂散光的干扰,在探测器前有一只通过632.8 nm的干涉滤光片,信号最后送到锁相放大器(Stanford Research System SR830, Dual-phase DSP Lock-in Amplifier)与从调制器送来的标准参考信号进行相关运算放大。

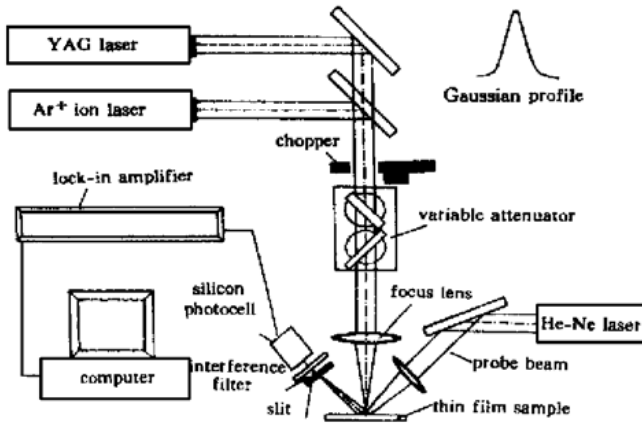


Fig. 5 Experimental setup of the weak absorptance measurement using STLTL

理论上,在样品形变不大的情况下,光热信号与形变高度有一段线性区域,而形变高度正比于薄膜的吸收系数,因此在其他条件确定的情况下,信号光强正比于薄膜的吸收系数,这就是用热透镜技术测量薄膜吸收的理论根据。图 6 给出了光热信号(振幅)随抽运激光功率的变化关系。实验中我们使用吸收较强的 C 膜,抽运激光为 1064 nm YAG 激光,测量中通过连续可调功率衰减器使功率从 0.02 W 变到 0.3 W;探测激光使用 He-Ne 激光 632.8 nm,

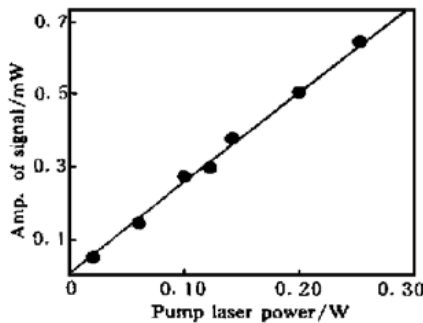


Fig. 6 The curve of the power of pump beam and thermal signal

抽运光调制频率为 540 Hz。从图中可以看出,实验结果与理论计算有很好的切合,在很宽的功率范围内是成理想的线性关系的,这对光学薄膜的弱

吸收定标测量是很关键的。

由于光热信号得到的是相对量,必须对信号的数值进行定标。实际工作中,采用大吸收的 C 膜作为定标样品的好处是: 1) 可用分光光度计直接测量 C 膜的吸收(散射损耗影响甚微); 2) 光热信号易于获取。但是,大吸收样品也存在着问题: 1) 往往很容易被高度聚焦的抽运光打坏; 2) 理论上我们所能测量的线性范围也是相当有限的。因此必须增加对抽运光的衰减,通过不同透过率的选择来扩展测量线性范围。同时,不同样品对探测光的反射率的差异也会造成测量的不可靠,这些都必须要在信号的最终定标中反映出来。设定标信号为 S_c 。样品信号为 S_s ,定标 C 膜的吸收为 A_c ,反射率为 R_c ,抽运光的功率为 P_p ,探测光的功率为 P_t ,抽运光衰减器的透过率为 T_{pc} ,探测干涉滤光片透过率 T_{tc} ,被测样品吸收为 A_s ,反射率为 R_s ,测量滤光片透过率 T_{ps} ,探测光滤光片透过率 T_{ts} ,则有

$$A_s = A_c \left[\frac{T_{pc} T_{tc} R_c S_s}{T_{ps} T_{ts} R_s S_c} \right] \quad (8)$$

只要抽运光和探测光的强度足够大,通过调节功率衰减器的透过率,可以足够精确地测量出光学薄膜的微弱吸收。对吸收率为 8% 的 C 膜,探测信号为 20 μ V,锁向放大器可获得最低稳定信号为 50 nV,则信号灵敏度为 $8 \times 10^{-2} \times 2.5 \times 10^{-3} = 2 \times 10^{-4}$ 。抽运光为 2 W 的 YAG 光源,对同样吸收率的 C 膜,欲获得 20 μ V 定标信号, $T_{pc} = 20 \times 10^{-3} / 2 = 1/100$,信号灵敏度为 2×10^{-6} ,大大超过了一般薄膜样品的灵敏度。表 1 给出几种典型 1064 nm 全反膜吸收测量结果,和相应的 1.06 μ m 薄膜的破坏阈值(LITD)。其破坏阈值的定义及测量方法参见文献[13, 14]。从中可见,吸收的结果与破坏阈值有较好的对应关系。

Table 1 The absorptance character of several typical high-reflective coatings at 1064 nm and their laser induced damage threshold

sample	material	method	LIDT J/cm^2 (FWHM 5 ns)	absorptions ppm
No. 1	ZrO ₂ :Y ₂ O ₃ /SiO ₂	good substrate, super polish, no bake	33.63	27.3
No. 2	ZrO ₂ :Y ₂ O ₃ /SiO ₂	normal substrate, no super polish, no bake	22.52	51.9
No. 3	HfO/SiO ₂	good substrate, super polish, no bake	12.37	68.3
No. 4	HfO/SiO ₂	normal substrate, super polish, no bake	10.82	176.8

结论 基于采用大光斑探测光束的表面热透镜技术是本文论述的重点,由以上理论和实验研究及结果分析可见:光热信号强度变化即反映了薄膜吸收特性,测量其强度的变化并同已知定标样品比较,就得

到薄膜的吸收。比较传统的光热偏转方法与表面热透镜技术:首先,由于大光斑探测光的引入而使表面热透镜技术更易于优化、调节信号,测量的准确度和可重复率得到了提高,而同时保持了光热偏转方法

的灵敏度;其次,光热偏转方法探测的是表面变形区域中某一点的斜率,而表面热透镜技术通过使用针孔光电探测器可反演获得整个表面变形区域的形状分布,通过对实验数据的数值拟合可得出样品的光学、热学以及机械性能,从而消除光热探测技术中由于定标手段而引入的系统误差;通过高度聚焦抽运光,表面热透镜技术可以作径向分辨的样品吸收图谱,这也是我们今后研究的重点。总之,我们认为这种测量技术必将有很大的应用前景。

致谢 中科院上海光机所易葵、陆月妹工程师为本实验提供了优质的光学薄膜样品,中科院上海光机所刘晔高工对样品的测量给予了极大的帮助和悉心指点,在此特致以谢意。

参 考 文 献

- [1] Li Bingchen, Deng Yanzhuo, Cheng Jieke. Separation of optical thin film and substrate absorption by obliquely crossed photothermal deflection: Theory. *J. Mod. Opt.*, 1995, **42**(5): 1093~ 1107
- [2] Maznev A A, Hartmann J, Reichling M. Thermal wave propagation in thin films on substrates. *J. Appl. Phys.*, 1995, **78**(9): 5266~ 5269
- [3] Franko M, Tran C D. Analytical thermal lens instrumentation. *Rev. Sci. Instrum.*, 1996, **67**(1): 1~ 18
- [4] Wu Z L, Kuo P K, Thomas R L *et al.*. Absorption measurement of thin films by using photothermal techniques: The influence of thermal properties. *Proc. SPIE*, 1994, **2428**: 113~ 114
- [5] Wu Z L, Kuo P K, Lu Y S *et al.*. Laser induced surface thermal lensing. *Proc. SPIE*, 1996, **2714**: 294~ 304
- [6] Wu Z L, thomsen M, Kuo P K *et al.*. Overview of photothermal characterization of optical thin film coatings. *Proc. SPIE*, 1996, **2714**: 466~ 481
- [7] Reichling M, Welsch E, Duparre A *et al.*. Photothermal absorption microscopy of defects in ZrO₂ and MgF₂ single layer films. *Opt. Engng.*, 1994, **33**(4): 1334~ 1342
- [8] Reichling M, Bodemann A, Kaiser N. A new insight into defect-induced laser damage in UV multilayer coatings. *Proc. SPIE*, 1994, **2428**: 354~ 361
- [9] Chow R, Taylor J R, Wu Z L *et al.*. High reflector absorptance measurements by the surface thermal lensing technique. *Proc. SPIE*, 1997, **2966**: 354~ 361
- [10] Oesterschulze E, Stopka M. Photothermal imaging by scanning thermal microscopy. *J. Vac. Sci. Technol. (A)*, 1996, **14**(3): 1172~ 1177
- [11] Balkowski S E, Chartier A. Diffraction effects in single and two-laser photothermal lens spectroscopy. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(27): 6711~ 6721
- [12] Jurgensen F, Schroer W. Studies on the diffraction image of a thermal lens. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(1): 41~ 50
- [13] Fournier D, Boccara A C. Sensitive in situ trace-gas detection by photothermal deflection spectroscopy. *Appl. Phys. Lett.*, 1980, **37**(6): 519~ 521

Measuring Weak Absorptance of Thin Film Coatings by Surface Thermal Lensing Technique

Hu Haiyang Fan Zhengxiu

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese of Academy Sciences, Shanghai 201800)

Zhao Qiang

(Eastern Michigan University, Ypsilanti, MI 48197, USA)

(Received 30 September 1999; revised 13 December 1999)

Abstract: A novel sensitive and simple scheme, referred to as the surface thermal lensing technique, has been introduced for detecting and analyzing the thermal waves to get information about weak absorptance of optical coatings. Its diffraction theory is presented briefly. Several samples for the Robin absorptance measurements have been tested using this method, and the measurement results have been analyzed.

Key words: surface thermal lensing technique; thermal deflection technique; optical thin films; weak absorption; thermal lens