

表面热透镜技术应用于薄膜微弱吸收测量的理论和实验^{*}

范树海¹⁾²⁾ 贺洪波¹⁾ 范正修¹⁾ 邵建达¹⁾ 赵元安¹⁾²⁾

1) 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

2) 中国科学院研究生院, 北京 100039)

(2005 年 3 月 24 日收到, 2005 年 7 月 5 日收到修改稿)

由薄膜表面光热形变简化理论和表面热透镜衍射理论导出表面热透镜信号表达式, 从理论上证明了表面热透镜信号和薄膜吸收率的线性关系. 应用表面热透镜技术研制了薄膜吸收测量仪, 测量结果表明其吸收率测量灵敏度和精度均达 10^{-6} 量级.

关键词: 吸收测量, 表面热透镜, 光热形变, 薄膜

PACC: 6770, 4215E, 6570, 7865

1. 引 言

吸收损耗是影响薄膜性能的重要参数. 在强激光系统中, 光学薄膜的吸收会导致抗激光损伤能力的明显下降; 光通信领域中, 吸收会导致各种高性能光学薄膜滤光片损耗增加、性能下降甚至失效. 目前性能优异的介质薄膜在可见及近红外波段的吸收率已经达到 10^{-6} 量级甚至更小. 传统的分光光度法^[1]、消光系数换算法^[2]、激光量热法^[3]等方法已无法满足测量要求. 表面热透镜技术^[4-7]是近年来发展起来的测量薄膜微弱吸收的一种新手段, 它具有灵敏度高、调节方便等优点. 本文给出薄膜表面光热形变和表面热透镜衍射效应的理论模型, 并展示了我们采用该技术研制的吸收测量仪的结构和测量结果.

2. 理论模型

表面热透镜技术的原理如图 1 所示. 强度调制的抽运激光会聚入射到薄膜样品表面, 薄膜吸收热量并扩散到基底引起薄膜系统的温升, 温升导致热膨胀形成“表面热包”, 这种现象也被称为“光热形变”. 一束探测激光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, 反射探测激光将出现衍射环, 这种现象被称为“表面热透镜效应”. 实验结果表明, 在一定条件下, 反射探测激光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.

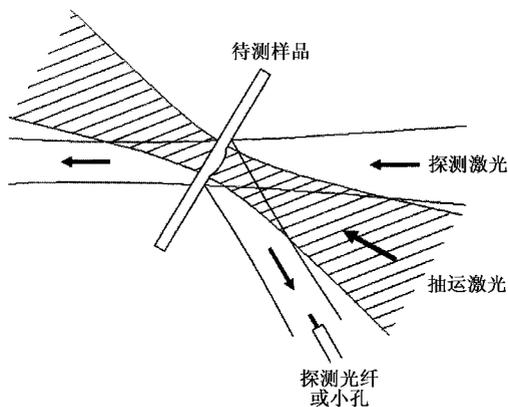


图 1 表面热透镜技术原理图

2.1. 光热形变简化理论

在表面热透镜技术中, 通过薄膜系统中温度场和热弹性方程的求解可得出较为严格的光热形变的表达式^[7-9]. 但这些表达式较为复杂, 难以获得数值解. 可用光热形变的简化理论来近似描述薄膜系

^{*} 上海市科学技术委员会光科技专项行动计划(批准号 011661076)资助的课题.

统的光热形变. 从热波传导理论和线性热膨胀理论出发, 通过对热分布区域体积和温升的近似计算, 即可得到理想薄膜系统光热形变的简化理论. 该简化理论的详细内容将撰文另述.

当基底吸收远小于薄膜吸收, 膜厚满足光薄(膜厚远小于吸收长度), 热薄(膜厚远小于热扩散长度)条件, 基底满足热厚条件, 光热形变很小时, 样品表面的光热形变可近似表示为

$$u(r, t) = \frac{AP_0(\alpha_{\text{T}}d + \alpha_{\text{T}_s}\mu_s)}{8fR^2(\exp[-c\mu_{\text{T}}f] + 1)(\rho_{\text{T}}c_{\text{T}}d + \rho_s c_s \mu_s)} \times \exp\left[-\frac{r^2}{R^2(\exp[-c\mu_{\text{T}}f] + 1)}\right] \times [\cos(\omega t + \theta) + 1]. \quad (1)$$

热包中心的最大形变高度 u_0 为

$$u_0 = \frac{AP_0(\alpha_{\text{T}}d + \alpha_{\text{T}_s}\mu_s)}{4fR^2(\exp[-c\mu_{\text{T}}f] + 1)(\rho_{\text{T}}c_{\text{T}}d + \rho_s c_s \mu_s)}. \quad (2)$$

当抽运激光调制频率很低(如在 50 Hz 以下)时, (1)(2)式可进一步简化为

$$u(r, t) = \frac{AP_0\alpha_{\text{T}_s}}{32fR^2\rho_s c_s} \exp\left[-\frac{r^2}{4R^2}\right][1 - \cos(\omega t)], \quad (3)$$

$$u_0 = \frac{AP_0\alpha_{\text{T}_s}}{16fR^2\rho_s c_s}, \quad (4)$$

式中 A 为薄膜的吸收率, P_0 为抽运激光的功率, f 为抽运激光的调制频率, R 为样品表面抽运激光的光斑半径.

当调制频率较低(如低于 50 Hz), 基底膨胀系数与薄膜相比不太小, 薄膜厚度不大(如小于 $4 \mu\text{m}$)时, (3)(4)两式的数值很接近(1)(2)式. 在下面的讨论中都用(3)(4)式来表示热包高度.

从(4)式可以看出, 表面热包的峰值高度与薄膜的吸收率成正比, 而与薄膜的其他特性如热导率、厚度、比热容等无关, 这就为薄膜吸收率的定标和测量提供了可能性.

2.2. 表面热透镜衍射理论

定义 z_{sw} 为薄膜样品表面到探测激光腰斑的距离, 若探测激光在到达样品前聚集, 则 z_{sw} 为负, 若探

测激光在被样品反射后聚集, 则 z_{sw} 为正. 定义 z_{sd} 为薄膜样品表面到探测平面(即探测光纤端面)的距离, z_{sd} 始终为正.

热包对反射探测激光的影响可用相位因子 ϕ 表示

$$\phi = \exp[-i2ku(r, t)]. \quad (5)$$

入射到样品表面的探测激光(基模高斯光束)在样品表面的场强表达式为

$$E_0 = C \frac{\omega_0}{\omega_1} \exp\left[-ikz_{\text{sw}} - \frac{ik}{2q}r^2 + i \arctan\left(\frac{z_{\text{sw}}}{f}\right)\right], \quad (6)$$

式中 ω_0 为探测激光束腰半径, ω_1 为样品表面探测激光光斑半径.

从样品表面反射的探测激光在样品表面的场强表达式为

$$E_1 = E_0 \exp[-i2ku(r, t)]. \quad (7)$$

根据菲涅尔衍射理论, 接收屏上的场强和光强分布分别为

$$E(r, t) = \frac{\exp[ikz_{\text{sd}}]}{i\lambda z_{\text{sd}}} E_1 \otimes \exp\left[\frac{ik}{2z_{\text{sd}}}r^2\right] = C \frac{\exp[i \arctan(z_{\text{sw}}/f) + ik(-z_{\text{sw}} + z_{\text{sd}})]\omega_0}{i\lambda z_{\text{sd}}\omega_1} \times \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left[-\frac{ik}{2q}(\alpha^2 + \beta^2) - i2ku(r, t)\right] \times \exp\left[\frac{ik}{2z_{\text{sd}}}((x - \alpha)^2 + (y - \beta)^2)\right] d\alpha d\beta, \quad (8)$$

$$I(r, t) = C_1 |E(r, t)|^2, \quad (9)$$

式中 \otimes 表示卷积, $r^2 = x^2 + y^2$.

接收屏上光强的时间平均值为

$$I(r) = \frac{1}{T} \int_0^T I(r, t) dt. \quad (10)$$

(8)式中的积分过于复杂难以计算, 可将 $\exp[-i2ku(r, t)]$ 用泰勒级数在 $u_0 = 0$ 点关于 u_0 展开. 实际计算中我们省略 u_0 的一次项以上的高阶项, 这在 u_0 很小的情况下是允许的,

$$\exp[-i2ku(r, t)] \approx 1 - iku_0 \exp[-r^2/(4R^2)] \times [1 - \cos(\omega t)]. \quad (11)$$

将(11)式代入(8)式得

$$E(r, t) = C \frac{\exp[-i \arctan(z_{\text{sw}}/f) + ik(-z_{\text{sw}} + z_{\text{sd}})]\omega_0}{i\lambda z_{\text{sd}}\omega_1} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \left\{ 1 - iku_0 \exp\left[-\frac{\alpha^2 + \beta^2}{4R^2}\right][1 - \cos(\omega t)] \right\} \times \exp\left[-\frac{ik}{2q}(\alpha^2 + \beta^2) + \frac{ik}{2z_{\text{sd}}}((x - \alpha)^2 + (y - \beta)^2)\right] d\alpha d\beta. \quad (12)$$

结合(4)式对(12)(9)式进行数值模拟的结果表明,当 u_0 很小时(1 nm 以下),反射探测光斑中心的平均光强可表示为

$$I = I_{\text{probe}0}(C_2 A I_{\text{pump}} + 1), \quad (13)$$

式中, $I_{\text{probe}0}$ 表示热包高度为零时反射探测激光光斑中心的平均光强, I_{pump} 表示入射到薄膜样品表面的抽运激光光强.

定义表面热透镜信号为

$$S = I - I_{\text{probe}0} = C_2 A I_{\text{probe}0} I_{\text{pump}}, \quad (14)$$

式中 C_2 在同样的实验参数下是一个常数,它可通过测量吸收率已知的定标样品表面热透镜信号来确定. 这样,通过(14)式就可以测量薄膜的吸收率.

数值模拟的结果表明,若测量系统对表面热透镜信号 S 的变化分辨率为 10^{-4} 时,能测量的最小热包平均高度可达 10^{-12} m. 这个高度对应于 K9 玻璃基底上通常介质薄膜 10^{-8} 的吸收率.

(14)式中参数 C_2 与抽运激光调制频率 f 、样品表面抽运激光的光斑半径 R 、探测激光束腰半径 ω_0 以及 z_{sw} 、 r_{sd} 等实验参数有关. 通过数值模拟我们可以找出最大表面热透镜信号对应的实验参数,从而大大提高吸收测量灵敏度. 具体的优化方法也将撰文另述.

3. 测量装置和测量结果

图2给出了基于表面热透镜技术的薄膜吸收测量装置示意图,其中抽运激光器采用最大输出功率100 W的1.06 μm YAG连续激光器,探测激光器采用输出功率为10 mW的He-Ne激光器,机械斩光器的调制频率约为10 Hz.

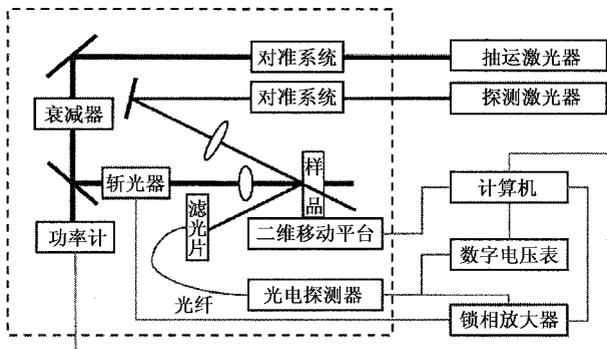


图2 基于表面热透镜技术的薄膜吸收测量装置示意图

表1给出了一组薄膜吸收测量结果,这是四片

全介质窄带滤光片(带宽约为8 nm)对1064 nm激光的吸收率,每个样品测量8个点的吸收.

表1 全介质窄带滤光片吸收测量结果

| 透射峰值波长/nm | 978 | 1015 | 1050 | 1064 |
|-------------------|-----|------|------|------|
| 吸收率平均值/ 10^{-6} | 19 | 19 | 57 | 407 |

表1中的测量结果很好地反映了物理实际.对于峰值波长为1064 nm的滤光片,抽运激光波长恰好处于它的通带内,由于共振吸收导致吸收率较大;对于978和1015 nm滤光片,抽运激光波长位于它的通带外,此时滤光片相当于一个高反膜,抽运激光能量难以深入薄膜内部,吸收必然很小.而对于1050 nm滤光片,抽运激光波长位于通带边缘,其吸收率数值也处于两者之间.

图3给出了45°1064 μm 高反膜线扫描吸收测量结果.吸收曲线底部的吸收率约为 5.2×10^{-6} .曲线左侧的尖峰表明这里有一个吸收缺陷.

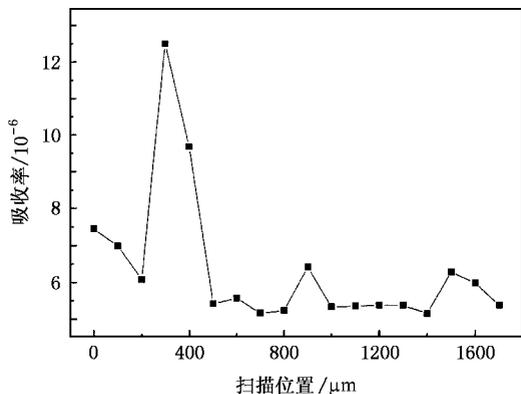


图3 45°1064 μm 高反膜线扫描吸收测量结果

我们对一块吸收均匀性较好的 Ta_2O_5 薄膜样品进行了多次测量,测量方法如下:每次在6 mm \times 4 mm的区域内做三次线扫描,每条线扫描30个点,点距为200 μm ,线距为2 mm.对同一样品的不同位置进行10次测量,获得了10个吸收率平均值,如表2所示.这10次测量的平均值为 47.9×10^{-6} ,标准偏差为1.0

$$\times 10^{-6}. \text{标准偏差定义为} \sqrt{\frac{n \sum x^2 - (\sum x)^2}{n(n-1)}}.$$

表2 Ta_2O_5 薄膜样品吸收率

| 测量次数 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 吸收率平均值/ 10^{-6} | 48.4 | 48.7 | 49.4 | 47.2 | 48.9 | 46.7 | 48.0 | 47.4 | 46.1 | 47.8 |

4. 结 论

表面热透镜技术是测量薄膜微弱吸收的有效手段。从理论和实验结果可以看出,该技术具有较好

的测量准确性(线性度好),而且灵敏度高(达 10^{-6} 量级),基本上可以满足现有优质薄膜的吸收测量要求。若对测量仪器参数和噪声性能进一步进行优化,则吸收测量灵敏度可望达到 10^{-8} 量级。

- [1] Zhang Q F, Hou S M, Zhang G M *et al* 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 561 (in Chinese) [张琦锋、侯士敏、张耿民等 2001 物理学报 **50** 561]
- [2] Zhang G J, Gu D H, Gan F X *et al* 2005 *Chin. Phys.* **14** 218
- [3] Tang J F, Gu P F 1989 *Thin Film Optics and Technology* (Beijing: Mechanical Industry Press) (in Chinese) [唐晋发、顾培夫 1989 薄膜光学与技术(北京:机械工业出版社)]
- [4] Wu Z L, Kuo P K, Lu Y S *et al* 1995 *SPIE* **2714** 294
- [5] Chow R, Taylor J R, Wu Z L *et al* 1997 *SPIE* **3244** 376
- [6] Li B C, Zhang S Y, Fang J W *et al* 1997 *Rev. Sci. Instrum.* **68** 2714
- [7] Yin Q R, Wang T, Qian M L *et al* 1991 *Photoacoustic and Photothermal Technique and Application* (Beijing: Science Press) (in Chinese) [殷庆瑞、王通、钱梦等 1991 光声光热技术及其应用(北京:科学出版社)]
- [8] Sun C W, Lu Q S, Fan Z X *et al* 2002 *Laser Irradiation Effect* (Beijing: Defence Industry Press) (in Chinese) [孙承伟、陆启生、范正修等 2002 激光辐照效应(北京:国防工业出版社)]
- [9] Commandr M, Roche P 1996 *Appl. Opt.* **35** 5021

Theory and experiment of surface thermal lens technique used in absorption measurement of thin films^{*}

Fan Shu-Hai^{1,2)} He Hong-Bo¹⁾ Fan Zheng-Xiu¹⁾ Shao Jian-Da¹⁾ Zhao Yuan-An^{1,2)}

1) Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

2) Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

(Received 24 March 2005; revised manuscript received 5 July 2005)

Abstract

The expression of surface thermal lens (STL) signal is deduced from photothermal deformation theory of thin film surface and STL diffraction theory. The linearity of STL signal to absorption of thin film can be seen from the expression. A measurement apparatus for thin film absorption based on STL technique is constructed. The measuring results prove that the sensitivity and accuracy of this instrument reach 10^{-6} magnitude.

Keywords: absorption measurement, surface thermal lens, photothermal deformation, thin film

PACC: 6770, 4215E, 6570, 7865

* Project supported by the Optical Science and Technology Program from the Science and Technology Committee of Shanghai, China (Grand No. 011661076).