

利用表面热透镜方法测量光学元件热扩散率

胡晨璐^{1,2,3}, 李大伟^{1,2*}, 刘晓凤^{1,2}, 李笑玲^{1,2}, 赵元安^{1,2,3}, 邵建达^{1,2,4}

¹中国科学院上海光学精密机械研究所薄膜光学实验室, 上海 201800;

²中国科学院强激光材料重点实验室, 上海 201800;

³中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049;

⁴中国科学院大学杭州高等研究院, 浙江 杭州 310024

摘要 提出了一种基于表面热透镜技术的热扩散率测量方法。利用脉冲泵浦光加热样品, 热量沿膜层传导形成温度场, 温升区域热膨胀形成表面热包, 其对探测光具有调制作用, 产生了表面热透镜效应。通过分析热透镜信号的相位与探测距离的关系, 求出了对应泵浦光频率下的热扩散长度, 进而求得热扩散率。测量了膜厚为 150 nm 的铬膜样品的热扩散率, 所提方法的测量结果为 $36.9 \text{ mm}^2/\text{s}$, 与光热偏转法的测量误差仅为 0.8%, 与其他不同类型样品在两种方法下的测量结果也较为接近, 证明了所提方法的有效性。相对于光热偏转法, 所提方法具有装置简单、受环境影响较小等优点。

关键词 薄膜; 激光光学; 激光损伤; 表面热透镜; 热扩散率

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL202249.2103101

1 引言

固体薄膜在先进的集成电路、微纳机电系统 (MEMS)^[1-2] 等器件, 以及惯性约束聚变^[3]、高功率激光器^[4-7] 等大型装置中有广泛的应用, 其中材料的热物理性质和最终产品的导热优化对装置有重要的影响。例如, MEMS 器件在单位时间内产生相当大的热量, 过快升高的温度会影响器件的正常工作, 甚至将其烧毁^[8]。对于高能连续激光系统, 光学元件尤其是薄膜元件会由于热损伤问题^[9-11] 而在短时间内遭到破坏。因此有必要研究这些器件热量的产生和扩散, 必要时还要进行强制散热。

长脉冲或连续激光辐照下的激光损伤机制是热熔融或热力耦合, 而在热源一定的条件下热扩散率决定了温度场分布, 从而决定了损伤形式以及阈值高低, 因此可以通过改善薄膜元件的热扩散率来提高激光损伤阈值。热扩散率反映了材料内部温度趋于一致的速度, 是评估器件工作效率和可承载功率的关键参数。在电子器件的生产和封装过程中, 必须考虑散热的因素。采用高热扩散率材料, 有利于迅速散热, 从而改善内部器件的性能并延长使用寿命。由此可见, 材料的热扩散率是许多领域必须考虑的重要因素, 在生产生活中具有重要的意义。

但薄膜的热物理性质与体材料相比, 特异性更加明显, 薄膜的微结构、杂质和缺陷等因素均会导致其热扩散率出现较大差异。对于不同制备方法合成的薄膜, 微结构有很大的差别, 会影响有效热扩散率。材料的缺陷也会影响热扩散率的测量。薄膜的热扩散率不再是材料的本征属性, 它还取决于材料的尺寸、形状、边界和制备方法等因素^[12]。而热波法^[13] 等测量块状材料热扩散率的传统方法难以测试薄膜, 因此需要设计针对薄膜材料的热扩散率测试方法。

目前报道的测试薄膜材料热扩散率的方法主要有闪光法^[14-15]、交流量热法^[16]、微桥法^[17]、光声法^[18]、光热偏转法 (PDS)^[19-21] 等。其中闪光法、交流量热法和光声法均无法测量亚微米级及以下厚度的薄膜。目前广泛使用的闪光法虽然制样、测量方法简单, 但精确度有限, 也无法测量基板上的薄膜。微桥法虽然可以测量亚微米级薄膜, 但制样过程复杂, 精确度有限。而 PDS 可以用于纳米薄膜测量并具有高灵敏度, 但探测光必须聚焦到比热变形区域和泵浦光斑更小的区域内, 泵浦光和探测光的相对位置对光热信号的检测也是至关重要的。这对激光的对准提出了很高的要求, 使得 PDS 对光路校准和环境噪声 (外部振动和热波动) 相当敏感且局限于实验室环境^[22]。

针对以上测量方法存在的弊端, 本文基于表面热

收稿日期: 2022-01-10; 修回日期: 2022-02-23; 录用日期: 2022-03-08

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFE0115900)、国家自然科学基金 (11874369, U1831211)、中科院战略性先导科技专项 (XDB1603)

通信作者: * lidawei@siom.ac.cn

透镜(STL)技术,提出了一种薄膜态材料及元器件的热扩散率测量方法。

2 基本原理

2.1 STL 技术原理

STL 效应的示意图如图 1(a) 所示,图 1(b) 为图 1(a) 中虚线方框区域的放大图。样品表面被一束强度调制的泵浦光辐照后产生温升,热量沿膜层传导形成温度场,温升区域热膨胀形成表面热包,如

图 1(b) 中的黑色半圆形区域所示。探测光束在样品表面上形成的光斑尺寸大于泵浦光光斑尺寸与热包尺寸,探测光束可以辐照整个热包区域。表面热包使探测光的反射波前产生畸变,如果将反射光沿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如同一个“透镜”。利用探测器测量探测光强的空间分布,可以得到时变热包的信号,进而得到与热包相关的信息,包括样品吸收率、热扩散率等。

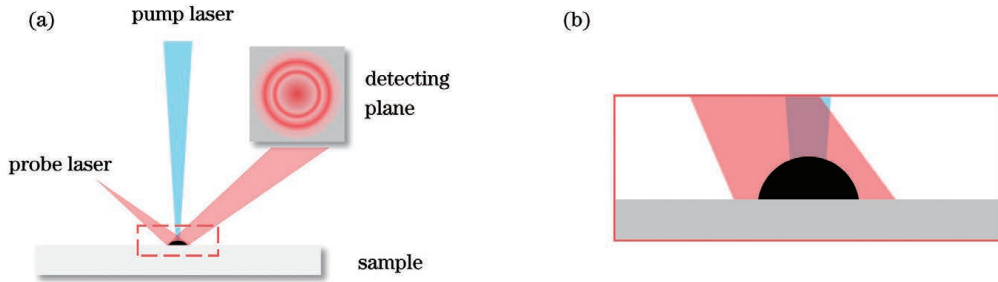


图 1 表面热透镜效应。(a)原理图;(b)样品表面的热包

Fig. 1 Surface thermal lens effect. (a) Schematic; (b) thermal bulge on sample surface

泵浦光辐照样品表面,样品表面的辐照点首先产生温升,随后热量向周围扩散引起样品表面更大范围

的温升,并产生更大范围的热膨胀,其变化过程如图 2(a) 所示。其中,三幅热包图分别对应的时间为

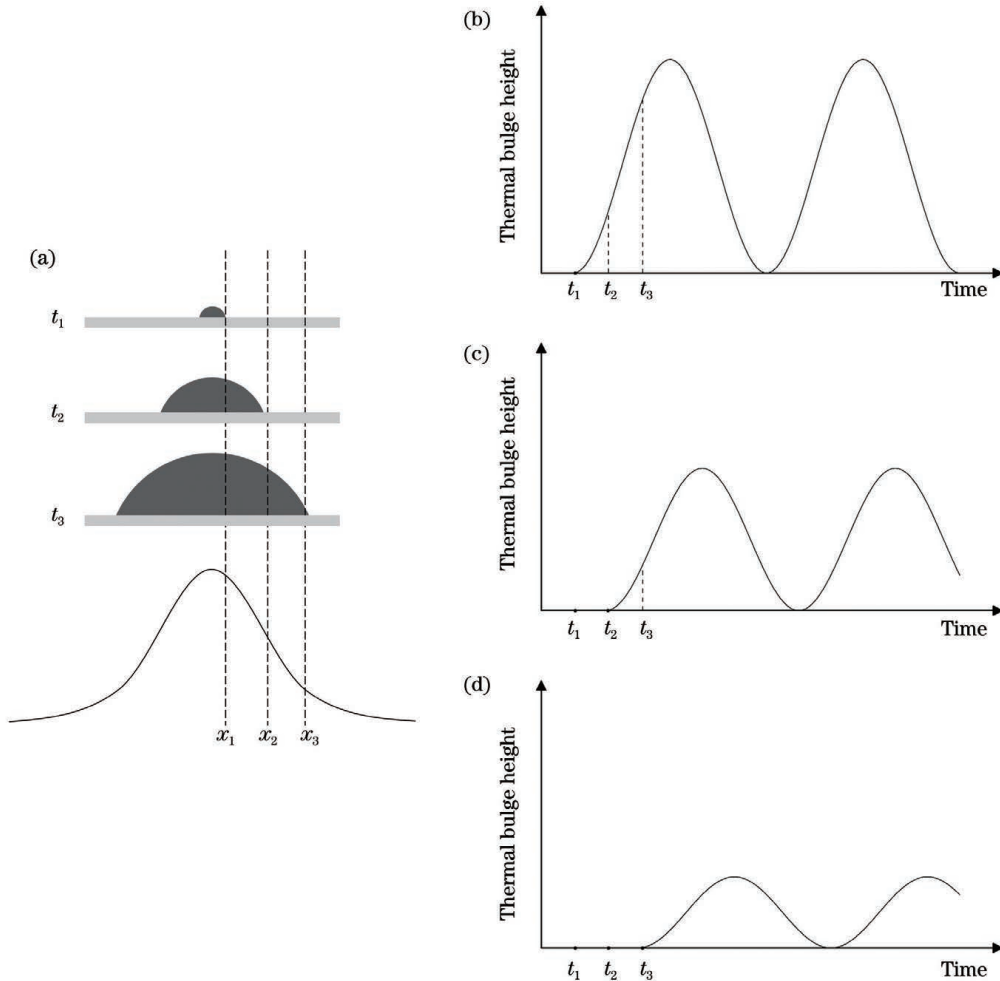


图 2 STL 技术测量热扩散率的原理图。(a)热包示意图;(b) x_1 、(c) x_2 、(d) x_3 处的热包高度随时间的变化图

Fig. 2 Schematics of STL technology for measuring thermal diffusivity. (a) Diagram of thermal bulge; thermal bulge heights at (b) x_1 , (c) x_2 , and (d) x_3 versus time

t_1, t_2 和 t_3 ($t_1 < t_2 < t_3 < T/2$, T 为泵浦光调制周期), t_1 时泵浦光开始辐照样品表面, x_1, x_2 和 x_3 分别表示样品表面以泵浦光光斑为中心的径向上的三个位置。图 2(b)~(d) 分别为 x_1, x_2 和 x_3 处的热包高度随时间的变化图。可以看到, 热量是由泵浦光斑处逐渐向周围扩散, 热包半径逐渐变大, 不同位置处的热包高度达到峰值的时间不同, 离泵浦光斑越远则形成热包的时间越滞后。因此, 径向上不同位置处的热包之间存在相位差, 而这个相位差反映的就是热量从中心向周围扩散所需要的时间, 其中包含热量传递的“速度”信息——热扩散率。

2.2 STL 理论分析

由 2.1 节内容可知, 为了计算材料的热扩散率, 需要知道 STL 信号的相位随传输距离的变化。如图 3 所示, 设辐照样品表面的泵浦光斑中心处的泵浦光功率为 P_0 , 光强呈高斯分布, 经过调制后功率为 $P_0(t)$, 则样品表面泵浦光光强分布 I_{fpump} 表示为

$$I_{\text{fpump}}(r, t) = [P_0(t)/R^2] \exp[-(r/R)^2], \quad (1)$$

式中: r 为探测距离, 即样品表面探测点与探测光斑中心的距离; R 为泵浦光斑的高斯半径; t 为辐照时间。图 3 中 d_0 为损伤点尺寸, Δx 为损伤点在探测平面上

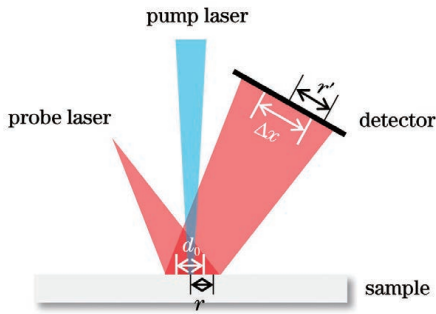


图 3 STL 技术测量热扩散率的示意图

Fig. 3 Schematic of measuring thermal diffusivity by STL technology

的影响区域尺寸, r' 为测量距离, 即探测平面上探测点与探测光斑中心的距离。

令样品表面 $t=0$ 时刻的中心点初始温度为 T_0 , 当泵浦光束的尺寸小于热扩散长度时, 由泵浦光引起的样品表面时变温度场 $T_f(r, t)$ [19] 可以表示为

$$T_f(r, t) = T_0 \exp(-r/\mu_f) \cos(2\pi ft - r/\mu_f), \quad (2)$$

式中: μ_f 为薄膜的热扩散长度; f 为泵浦光调制频率。

在光热光声技术的应用中, 热扩散长度的定义为材料内部温度值下降至激光作用点温度的 $\frac{1}{e}$ 时, 热量扩散所经过的距离。可以看到, 式 (2) 中仅 $\cos(2\pi ft - r/\mu_f)$ 项是时间相关项, 表示温度与时间的变化关系。

结合材料热膨胀系数, 由时变温度场可以求得时变热包高度表达式 $u(r, t)$:

$$u(r, t) = \alpha_{Tf} \Delta T(r, t) d + \alpha_{Ts} \Delta T(r, t) \mu_s = (\alpha_{Tf} d + \alpha_{Ts} \mu_s) \Delta T(r, t), \quad (3)$$

式中: α_{Tf} 为薄膜的线性膨胀系数; $\Delta T(r, t)$ 为泵浦光加热前后元件内部的温度差; α_{Ts} 为基底的线性膨胀系数; d 为薄膜的厚度; μ_s 为基底的热扩散长度。

由于薄膜材料厚度非常小, 薄膜在纵向上的温度场变化可以忽略, 因此可以采用热薄近似, 即认为薄膜表面的温度场分布与薄膜基底界面处基底的温度场分布是一致的。

以上是对泵浦光及其对样品的影响的分析。对于探测光, 令其入射至样品表面的电场强度为 E_0 , 则探测光经样品表面反射后在样品表面的电场强度分布 E_{f1} 为

$$E_{f1} = E_0 \exp[-i2ku(r, t)], \quad (4)$$

式中: k 为探测光的波矢。

根据菲涅耳衍射公式, 探测器接收屏上的电场强度分布 $E_d(r, t)$ [23] 表示为

$$E_d(r, t) = \frac{\exp(ikz_{sd})}{i\lambda z_{sd}} E_{f1} \otimes \exp(ikr^2/2z_{sd}) = C \frac{\exp[i\arctan(z_{sw}/f) + ik(-z_{sw} + z_{sd})r_{wprobe}]}{i\lambda z_{sd} r_{sprobe}} \times \exp[-i2ku(r, t)] \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left\{-\frac{ik}{2q}(x_0^2 + y_0^2) + \frac{ik}{2z_{sd}}[(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2]\right\} dx_0 dy_0, \quad (5)$$

式中: z_{sw} 为样品表面到探测激光腰斑的距离; z_{sd} 为样品表面到探测面的距离; r_{wprobe} 为探测光腰斑半径; r_{sprobe} 为样品表面探测光光斑半径; λ 为激光波长; C 为常数; q 为探测光经样品表面反射后到探测器的传播距离; $r^2 = x^2 + y^2$ 。

在式 (5) 中, 仅 $\exp[-i2ku(r, t)]$ 项与时间相关, 该项含有 $u(r, t)$, 反映了热包对反射探测激光的影响。由于其他项均与时间无关, 仅与样品表面探测距离 r 相关, 在探测器接收屏上的探测光光强分布 $I_{\text{dprobe}}(r, t)$ 可以简化为

$$I_{\text{dprobe}}(r, t) = C_1 |E_d(r, t)|^2 = A(r) \exp[-i4ku(r, t)] = A(r) \{1 - i4k(\alpha_{Tf} d + \alpha_{Ts} \mu_s) T_0 [\exp(-r/\mu_f) \cos(2\pi ft - r/\mu_f) - 1]\} = B(r) \cos(2\pi ft - r/\mu_f) - D(r), \quad (6)$$

式中: $C_1, A(r), B(r), D(r)$ 均为与时间无关的量; T_0 为 $t=0$ 时元件内的温度场分布; k 为探测光的波数。

STL 信号 S_{STL} 为反射探测光在某处的强度变化:

$$S_{STL}(r, t) = I_{dprobe}(r, t) - I_{dprobe}(r, t = 0) = B(r) \cos(2\pi ft - r/\mu_f) - D(r) - I_{dprobe}(r, t = 0). \quad (7)$$

可以发现, S_{STL} 的相位 $(2\pi ft - r/\mu_f)$ 与探测距离 r 呈线性关系, 其比例系数为 $-\frac{1}{\mu_f}$, 为计算方便, 令其为 m :

$$\frac{\partial(2\pi ft - r/\mu_f)}{\partial r} = -\frac{1}{\mu_f} = m. \quad (8)$$

将热扩散率长度公式 $\mu_f = \sqrt{\alpha/\pi f}$ 代入, 可计算得到热扩散率 α :

$$\alpha = \pi f / m^2. \quad (9)$$

由以上推导过程可知, 获得 S_{STL} 的相位及对应探测距离 r 后, 求出斜率 m , 即可根据式(9)求得热扩散率。

此外, 在实际测量过程中, 样品表面上的测量位置与泵浦光斑中心的距离 r 无法直接测量, 因此通过测量反射探测光光斑处的测量距离 r' 并根据对应关系进行计算, 如图 3 所示。为了得到探测距离 r , 需要引

入放大倍数 m_A :

$$r' = m_A r. \quad (10)$$

3 实验结果及分析

3.1 薄膜热扩散率测量仪的系统结构

热扩散率测量装置如图 4 所示, 其中 LIA 为锁相放大器, BNC adapter 为刺刀螺母连接器适配器。连续输出的 1064 nm 泵浦光经过由半波片和偏振片组成的功率调节装置后, 被斩波器调制成特定频率的激光脉冲, 经透镜聚焦后辐照样品表面。选用 He-Ne 光作为探测光, 使之在样品表面处与泵浦光斑重合。在探测光经过样品之后的反射光路上安装光电探测器用于收集热透镜信号, 并在探测器前设置微孔光阑用于解析不同位置处的热透镜信号。将热透镜信号输入锁相放大器, 并以斩波器输出的斩波同频信号作为参考信号, 测量热透镜信号的幅值及相位。

测量时, 以反射探测光光斑中心为起始测量点, 使探测器沿光斑径向移动, 由步进电机读取移动距离 r' , 由锁相放大器读取热透镜信号的幅值及相位 φ , 并根据 2.2 节数据处理方法, 计算热扩散率。

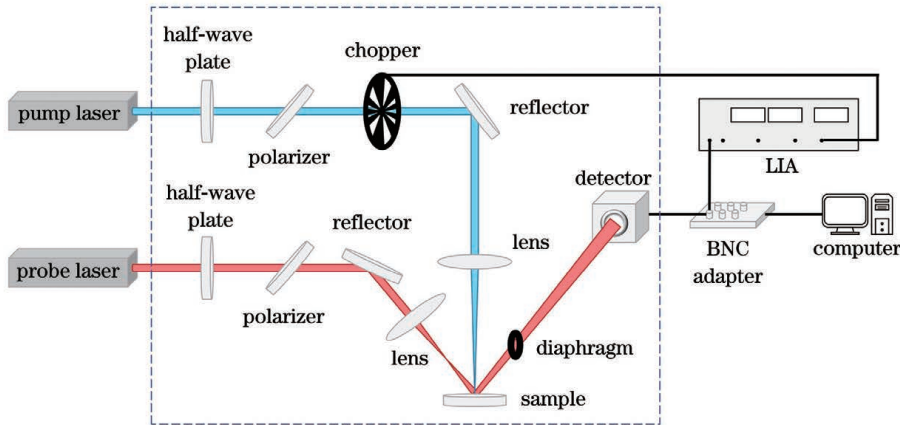


图 4 热扩散率测量装置示意图

Fig. 4 Schematic of thermal diffusivity measuring device

3.2 放大倍数 m_A 的确定

由 2.1 节可知, 为了计算热扩散长度, 需要测量样品表面不同位置处的热透镜信号, 而实际测量的是探测光束接收端到光斑中心的距离, 因此需要确定样品表面到探测器接收端的放大倍数 m_A 。

实验采用以熔石英为基底的电子束蒸发镀制的厚度为 150 nm 的铬膜样品。在铬膜样品表面打了 4 个损伤点, 分别对这 4 个损伤点的尺寸(直径为 d_0)进行测量。在无泵浦光的情况下, 利用探测光辐照损伤点区域, 测量该区域损伤前后的反射探测光斑光强。与无损伤处相比, 损伤点处的反射率降低, 故比较损伤前后的反射探测光斑, 光强较无损伤时减弱的区域即为损伤点影响区域(直径为 Δx)。由此可以得到损伤点尺寸 d_0 及损伤点在探测平面上的影响区域尺寸 Δx 。实验中为了减小偶然误差, 分别对 4 个损伤点进行测

量, 得到 4 组数据, 将其平均值代入后续计算, 结果如表 1 所示。

表 1 计算得到的 m_A
Table 1 Calculated m_A

Damage point No.	Δx /mm	d_0 / μm	m_A	\bar{m}_A
1	1.34	118	11.36	11.8
2	1.41	116	12.16	
3	1.45	121	11.98	
4	1.35	115	11.74	

3.3 薄膜样品的测量结果与讨论

分别利用 STL 和 PDS 对铬膜样品进行了热扩散率测试实验, 结果如图 5、6 所示。两种方法均采用 80 Hz 调制频率。STL 法中的泵浦光波长为 1064 nm,

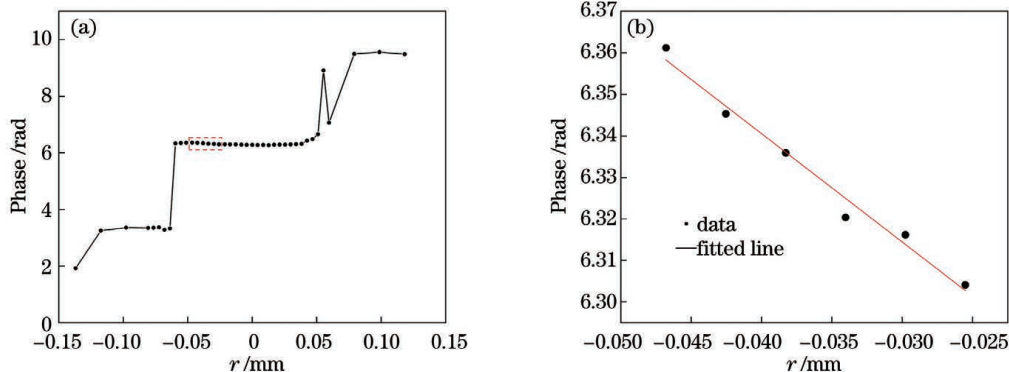


图 5 STL 方法的测量结果。(a) 相位与探测距离的关系; (b) 图 5(a) 中虚线框区域的放大图

Fig. 5 Measurement results by STL method. (a) Phase versus r ; (b) enlarged view of dotted box area in Fig. 5(a)

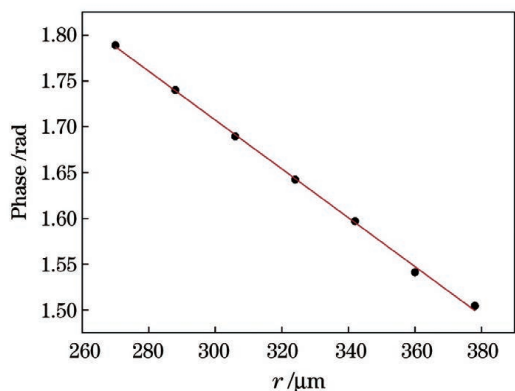


图 6 PDS 的测量结果图

Fig. 6 Measurement results by PDS

调制前的功率为 50 mW, 探测光波长为 632.8 nm。

图 5(a) 为整个径向上的相位数据。实验中设定探测光斑尺寸远大于泵浦光斑, 这使得探测光斑尺寸大于热包, STL 效应仅能作用于部分探测光束。分析发现, 热包作用范围内的相位数据具有较好的规律性, 而热包作用范围之外的相位数据起伏较大, 这是由热透镜作用引起的相位突变导致的, 因此予以舍弃。此外, 选取的数据点必须离泵浦光束的中心足够远, 这样可将其视为点热源。最终只选用了热包作用范围以内、泵浦光斑以外的部分数据。图 5(b) 为提取出来的热包作用区域沿半径方向的相位数据, 将该区域数据进行拟合, 得到斜率 m , 进而根据式(9) 计算热扩散率。STL 法及 PDS 的测量结果分别为 $36.9 \text{ mm}^2/\text{s}$ 及 $37.2 \text{ mm}^2/\text{s}$ 。此外, 还分别测量了石英基底的碳膜、高反膜 ($\text{SiO}_2/\text{HfO}_2$) 及增透膜 ($\text{SiO}_2/\text{HfO}_2$), 其中碳膜通过电子束蒸发法制备, 高反膜及增透膜均由磁控溅射法制备, 测量结果如表 2 所示。

两种方法的测量结果较为接近, 足以证明本方法的有效性。对于 STL 法, 在前面热量沿薄膜径向方向传导的理论模型中, 未考虑热辐射及表面自然对流散热对样品温度场的影响, 但在实际实验中, 热量不仅用于径向上的热传导, 还有一部分热量通过热辐射和热对流散热, 一部分向基底传导, 这些热量流失会导致测量结果偏小。

表 2 薄膜样品热扩散率的测试结果

Table 2 Measured thermal diffusivities of films

Sample	unit: mm^2/s	
	STL	PDS
Chromium film	36.9	37.2
Carbon film	45.1	47.5
High reflection film	14.7	17.1
Antireflective film	12.7	13.3

本文是基于 STL 技术测量薄膜态元件的热扩散率, 相较之前的 PDS, 虽然测量结果相近, 但有较大优势, 主要体现在两点: 一是调节方便。探测光采用大光斑, 方便对准, 同时避免了探测光束与样品表面距离调节对测量结果的影响, 这样可以节省大量繁琐的装置调节工作, 避免了调节不到位导致的误差。二是与 PDS 常以空气为传播介质^[21,24] 相比, STL 技术以探测光束作为介质传递热扩散信息, 可以避免样品周围气流扰动引入的信号波动及测量误差, 且后续可以将装置放置于真空环境下以减小空气对流散热, 从而提高测量准确率。

本测量方法基于 STL 原理, 使用的前提是膜层厚度满足热薄条件, 因此对于膜层厚度较大的样品, 需要降低泵浦光频率以保证热扩散长度。此外, 由 STL 原理可知, 基底是热膨胀的主体。膜层吸收热量后, 热量除了在膜层内部传导外, 还会沿纵向传导至基底, 如果基底材料的热扩散率大于膜层, 则基底内部的热量传导距离将有可能超过膜层, 此时测量的将是基底的热扩散率而非膜层。这是使用本方法测量热扩散率需要避免的情况。

4 结 论

提出了基于 STL 技术测量薄膜材料热扩散率的方法, 以光束为热扩散信号介质, 通过光电探测器检测热扩散过程并据此计算热扩散率。通过该装置测量了膜厚为 150 nm 的铬膜样品的热扩散率, 测量结果为 $36.9 \text{ mm}^2/\text{s}$, 与 PDS 的测量误差仅为 0.8%。此外, 与碳膜、高反膜及增透膜样品的测量结果也较为接近, 证明了所提方法的有效性。该方法为非接触测量, 对

试样无影响。相对于现有的光热正交偏转法,所提方法避免了 PDS 易受环境影响的缺点,并且调节简单,可以节省大量繁琐的调节工作。

参 考 文 献

- [1] Beigelbeck R, Cerimovic S, Reyes-Romero D, et al. Thermal properties of a thin-film membrane embedded in a multiparameter wind sensor: on-device characterization utilizing a transient measurement approach[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(10): 3409-3418.
- [2] Xu W, Wang X Y, Zhao X J, et al. Determination of thermal conductivities for thin-film materials in CMOS MEMS process [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2021, 70: 6001309.
- [3] Betti R, Hurricane O A. Inertial-confinement fusion with lasers [J]. *Nature Physics*, 2016, 12(5): 435-448.
- [4] Long G Y, Zhang Y P, Fan X L, et al. Deposition of high reflective films on deformable mirror for high power laser system [J]. *Optical Engineering*, 2020, 59(5): 057103.
- [5] Bonora S, Pilar J, Lucianetti A, et al. Design of deformable mirrors for high power lasers[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2016, 4: e16.
- [6] Li Y L, Ding J, Bai Z X, et al. Diamond Raman laser: a promising high-beam-quality and low-thermal-effect laser [J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2021, 9: e35.
- [7] Wang W, Sun D, Du X, et al. High-power operation of double-pass pumped Nd:YVO₄ thin disk laser[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2020, 8: e10.
- [8] Sim G D, Krogstad J A, Xie K Y, et al. Tailoring the mechanical properties of sputter deposited nanotwinned nickel-molybdenum-tungsten films [J]. *Acta Materialia*, 2018, 144: 216-225.
- [9] Gong H, Li C F, Li Z Y. CW-laser-induced thermal and mechanical damage in optical materials [J]. *Proceedings of SPIE*, 1999, 3578: 576-583.
- [10] Puttick K E, Holm R, Ristau D, et al. Continuous-wave CO₂-laser-induced damage thresholds in optical components [J]. *Proceedings of SPIE*, 1998, 3244: 188-198.
- [11] Du T Y, Huang D J, Cheng H, et al. Compensation method for performance degradation of optically addressed spatial light modulator induced by CW laser[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2022, 10: e7.
- [12] Gu H Q, Wang H R. Effect of strain on thermal conductivity of amorphous silicon dioxide thin films: a molecular dynamics study [J]. *Computational Materials Science*, 2018, 144: 133-138.
- [13] Cernuschi F, Bison P G, Figari A, et al. Thermal diffusivity measurements by photothermal and thermographic techniques [J]. *International Journal of Thermophysics*, 2004, 25(2): 439-457.
- [14] Parker W J, Jenkins R J, Butler C P, et al. Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity, and thermal conductivity [J]. *Journal of Applied Physics*, 1961, 32(9): 1679-1684.
- [15] Staicu D, Cozzo C, Pagliosa G, et al. Thermal conductivity of homogeneous and heterogeneous MOX fuel with up to 44 MWD/kgHM burn-up [J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2011, 412(1): 129-137.
- [16] Hatta I, Sasuga Y, Kato R, et al. Thermal diffusivity measurement of thin films by means of an ac calorimetric method [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1985, 56(8): 1643-1647.
- [17] Zhang X, Grigoropoulos C P. Thermal conductivity and diffusivity of free-standing silicon nitride thin films [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1995, 66(2): 1115-1120.
- [18] Yoshida A, Omae Y, Kurita T, et al. Measurement of the thermal diffusivity of metallic foils and films by the photoacoustic method [J]. *International Journal of Thermophysics*, 2000, 21: 513-524.
- [19] Suber G, Bertolotti M, Sibilica C, et al. Transverse photothermal deflection spectroscopy (PDS) applied to thermal diffusivity measurements [J]. *Journal of Thermal Analysis*, 1987, 32(4): 1039-1050.
- [20] Jackson W B, Amer N M, Boccara A C, et al. Photothermal deflection spectroscopy and detection [J]. *Applied Optics*, 1981, 20(8): 1333-1344.
- [21] Korte D, Pavlica E, Bratina G, et al. Characterization of pure and modified TiO₂ layer on glass and aluminum support by beam deflection spectrometry [J]. *International Journal of Thermophysics*, 2014, 35(11): 1990-2000.
- [22] Wu Z L, Kuo P K, Lu Y S, et al. Laser-induced surface thermal lensing for thin film characterizations [J]. *Proceedings of SPIE*, 1996, 2714: 294-304.
- [23] 范树海. 高灵敏度光学薄膜弱吸收测量仪的研制 [D]. 上海: 中国科学院上海光学精密机械研究所, 2005: 46-48.
Fan S H. High sensitive weak absorption apparatus for optical coatings [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2005: 46-48.
- [24] Korte D, Carraro G, Fresno F, et al. Thermal properties of surface-modified α -Fe₂O₃ and ϵ -Fe₂O₃ photocatalysts determined by beam deflection spectroscopy [J]. *International Journal of Thermophysics*, 2014, 35(11): 2107-2114.

Measuring Thermal Diffusivity of Optical Elements by Surface Thermal Lens Method

Hu Chenlu^{1,2,3}, Li Dawei^{1,2*}, Liu Xiaofeng^{1,2}, Li Xiaoling^{1,2}, Zhao Yuanan^{1,2,3}, Shao Jianda^{1,2,4}

¹Laboratory of Thin Film Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²Key Laboratory of Materials for High Power Laser, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

³Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

⁴Hangzhou Institute for Advanced Study, University of Chinese Academy of Sciences, Hangzhou 310024, Zhejiang, China

Abstract

Objective In the micro-electro-mechanical system, inertial confinement fusion, high power laser, and other fields, the

problem of thermal failure or even damage of thin film components has become increasingly prominent, which has raised the concern on the thermal characteristics of thin-film devices. Therefore, it is necessary to study the generation and diffusion of heat in these devices. In addition, if necessary, the forced heat dissipation is considered. Thermal diffusivity is a very important thermal parameter. The mechanism of laser damage, especially under long pulse or continuous laser irradiation, is thermal melting or thermal-mechanical coupling. Under certain heat sources, thermal diffusivity determines the temperature field distribution, thus determining the damage form and threshold. Therefore, the laser damage threshold of thin-film elements can be improved by improving thermal diffusivity. However, compared with bulk materials, the thermophysical properties of thin films are more specific. Different microstructures, impurities, and defects of thin films lead to great differences in thermal diffusivity. At present, there are not many high-precision measurement methods for micro-nano thin-film materials, and the existing methods have some disadvantages. Therefore, it is necessary to study a thermal diffusivity test method with high accuracy that is suitable for micro-nano thin-film materials, without letting the measurement results getting easily affected by the environment.

Methods In this paper, a thermal diffusivity measurement method based on surface thermal lens (STL) technology is proposed. Pulsed pump light is used to heat the sample and a temperature field is formed by conduction along the film layer. A surface thermal bulge forms and the probe light is modulated to form an STL effect because of the thermal expansion in the temperature rise area. As the heat gradually diffuses from the pump spot to the surrounding area, the radius of the heat bulge gradually becomes large, but the time for the heat bulge reaching its peak height is different at different positions. The larger the distance from the pump spot, the more delayed the time for forming the heat bulge. Therefore, there exist phase differences among heat bulges generated at different positions along the radial direction, and this phase differences reflect the time required for heat to diffuse from the center to the surrounding area, which is affected by thermal diffusivity. The phase of the STL signal is found to be linearly related to the detection distance, and its proportional coefficient is related to the thermal diffusion length. The thermal diffusivity can be calculated using the diffusion length and the modulation frequency of the pump light. In the experiment, the phase data of the STL signal can be directly measured by the lock-in amplifier and the measurement distance data can be read on the displacement platform. By calibrating the magnification of the measurement distance and the detection distance, the detection distance can be calculated. Following this, the slope can be calculated and then thermal diffusivity can be calculated by drawing the relationship diagram between the phase and the detection distance.

Results and Discussions The thermal diffusivity of chromium film samples with a film thickness of 150 nm is measured by the proposed method and photothermal deflection spectroscopy (PDS) (Fig.5). For the STL method, the wavelength of pump light is 1064 nm, the power before modulation is 50 mW, and the wavelength of probe light is 632.8 nm. The measurement result by STL method is $36.9 \text{ mm}^2/\text{s}$ and the measurement error is only 0.8% compared with that by PDS. To verify the applicability of this method, measurements are also conducted for carbon, high-reflection, and antireflective films. The data of the two methods are close enough to prove the effectiveness of this method.

Conclusions Compared with PDS, the STL method has two major advantages. First, it is convenient to adjust and the detection light is conveniently aligned with a large pump spot. Moreover, the influence of the adjustment of the distance between the probe beam and the sample surface on the measurement results is avoided, which can save a lot of tedious device adjustment work, and errors caused by inadequate adjustment are avoided. Second, compared with PDS, which often uses air as the transmission medium, STL uses the probe beam as the medium to transmit thermal diffusion information, which can avoid signal fluctuation and measurement error caused by air flow disturbance around the sample. The device can be placed in a vacuum environment to reduce heat dissipation via air convection and improve measurement accuracy. The proposed method has advantages of relatively high measurement accuracy, capability of measuring micro-nano thin-film materials, device simplicity, and less environmental influence. Moreover, it can be further optimized to improve the measurement accuracies.

Key words thin films; laser optics; laser damage; surface thermal lens; thermal diffusivity