

光学薄膜的光热偏转信号分析

范正修 苏星* 吴周令

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

提 要

本文给出了透明基体上的单层薄膜在激光辐照下的温度分布和光热形变偏转信号的理论表达式。通过数值计算,分析了偏转信号与薄膜参数、基体参数以及调制频率之间的关系,用反射式光热偏转装置对光学薄膜的光热偏转信号进行了实验研究。结果表明,理论计算和实验结果是一致的。

关键词: 光学薄膜, 光热偏转。

一、引 言

光热偏转光谱术是一种新型的热波探测技术,它不仅能够用于固体^[1]而且可以用于液体和气体^[2],不仅可以探测体材料的特性而且可以用来探测表面和薄膜的特性^[3,4]。它有灵敏度高,使用方便,通用性强等优点,受到材料和薄膜工作者的很大关注。近几年得到很快的发展。

有关光热偏转术的理论分析,前人已做过不少工作^[5,6]。但大多限于对单一的体材料或其表面进行分析,而对薄膜样品尚缺乏系统的研究。本文的目的在于对薄膜体系中的热光偏转信号进行研究,对信号的构成及其与测量参数,膜薄参数和基体参数之间的关系进行理论分析和数值计算,并把理论结果与实验结果进行了比较。

二、理 论

考虑如图1所示的单层膜系统。厚度为 l 的薄膜,沉积在厚度为 L 的基体上。薄膜的吸收系数为 α ,而基体的吸收则被忽略。当一束泵浦激光照射到薄膜上时,由于薄膜吸收而对系统加热;其温度场分布遵从热传导方程。

$$\nabla^2 T_i - \frac{1}{D_i} \frac{\partial T_i}{\partial t} = - \frac{Q_i(\mathbf{r}, t)}{D_i} \quad (1)$$

$i=0, 1, 2$ 分别对应入射介质、薄膜和基体。并有边界条件。

$$T_0|_{z=0} = T_1|_{z=0}, \quad (2)$$

$$K_0 \frac{\partial T_0}{\partial z} \Big|_{z=0} = K_1 \frac{\partial T_1}{\partial z} \Big|_{z=0}, \quad (3)$$

$$T_1|_{z=l} = T_2|_{z=l}, \quad (4)$$

$$K_1 \frac{\partial T_1}{\partial z} \Big|_{z=l} = K_2 \frac{\partial T_2}{\partial z} \Big|_{z=l} \quad (5)$$

这里 T_i , Q_i 分别为第 i 介质内的温升和热源, K_i 为第 i 种介质的热导率, D_i 是热扩散系数, 若 ρ_i , C_i 分别是密度和比热, 则

$$D_i = K_i / \rho_i C_i \quad (6)$$

$$\varphi_i(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{\pi} \frac{\alpha_i P_i}{\pi a^2} \exp(-r^2/a^2) \exp(i\omega t) \quad (7)$$

这里, α_i , P_i 分别是 i 介质的吸收系数和进入 i 介质的光束功率, a 是高斯光束的 e^{-1} 半径。由以上假设 $\alpha_0 = \alpha_2 = 0$, 所以 $\varphi_1 = \varphi_2 = 0$ 。

对方程求解, 则得到单层膜系的温度场分布, 该分布可表示为衰减的零级 Bessel 函数对 δ 的线性叠加

$\delta = 0$ 与空间频率相对应, 这种分布变化与波的变化可以类比, 称为热波, 热波波数

$$\beta_i = \text{Re}(\beta_i) + i \text{Im}(\beta_i) \quad (8)$$

$$\text{Re}(\beta_i) = [(\delta^4/4 + 4/L_{i\text{th}}^4)^{1/2} + \delta^2/2]^{1/2}, \quad (9)$$

$$\text{Im}(\beta_i) = [(\delta^4/4 + 4/L_{i\text{th}}^4)^{1/2} - \delta^2/2]^{1/2} \quad (10)$$

$\text{Re}(\beta_i)$ 的倒数表明了热波传播的有效长度, 可视为热波波长。

在求出温度分布的基础上, 可以对温度升高引起的光热表面变形求解。在我们的体系中, 热弹方程为

$$(1 - 2\nu_i) \nabla^2 \mathbf{u}_i + \nabla(\nabla \cdot \mathbf{u}_i) = 2(1 + \nu_i) \alpha_{\text{th}i} \nabla T_i \quad (11)$$

这里 $i=1, 2$ 分别表示薄膜和基体, \mathbf{u} 为弹性变形位移矢量, ν 为材料的泊松比, α_{th} 为材料的热膨胀系数。 T 为温度场分布。为了简化运算, 作如下假设:

(1) 考虑到不同材料间泊松比差别不大, 用基体的泊松比代替薄膜泊松比;

(2) 在光斑很小的情况下, 薄膜边界可以看成无穷大, 这时表面上法向应力分量可以忽略;

(3) 薄膜体系的总形变, 简化为基体形变与薄膜形变的叠加。略掉热物性界面跃变的影响。

此外, 由于光束偏转与薄膜体系形变的斜率成正比, 我们可以直接求解形变位移矢量对 r 的导数。则得:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_z}{\partial r}(r, 0) = & -\frac{\alpha_1 P_1}{4\pi^2 K_1} (1 + \nu) \int_0^\infty \Delta^2 d\Delta J_1(\Delta r/L_t) \exp(-\Delta^2 a^2/4L_t^2) \\ & / \{L_t^2 [\alpha_1^2 - \beta_1^2]\} / (\Delta^2 - sh^2 \Delta) \{ \alpha_{\text{th}1} [R_f(-\alpha_1, l) + C_{11} R_f(-\beta_1, l) \\ & + \bar{C}_{12} R_f(\beta_1, l)] + \alpha_{\text{th}2} [R_s(-\beta_2, L) \cdot \bar{C}_{21} \\ & + \bar{C}_{22} R_s(\beta_2, L)] \} \exp(i\omega t) \end{aligned} \quad (12)$$

这里

$$\begin{aligned} R_f(y, l) = & [\Delta + e^{-\Delta} \text{sh } \Delta] [\exp((yL_t + \Delta)l/L_t) - 1] / [yL_t + \Delta] \\ & - [\Delta + e^{\Delta} \text{sh } \Delta] [\exp((yL_t - \Delta)l/L_t) - 1] / [yL_t - \Delta], \end{aligned} \quad (13)$$

$$R_s(y, l) = [\Delta + e^{-\Delta} \text{sh } \Delta] [\exp((yL_t + \Delta) \cdot L/L_t) - 1] \exp(\Delta \cdot l/L_t) / (yL_t + \Delta)$$

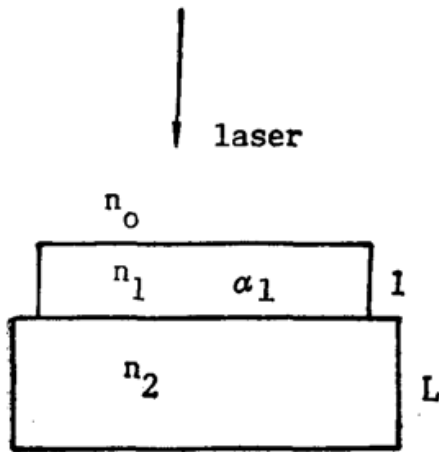


Fig. 1 The single layer on transparent substrate

$$-[\Delta + e^{\Delta} \text{sh} \Delta] [\exp((yL_t - \Delta) \cdot L/L_t) - 1] \exp(-\Delta \cdot l/L_t) / (yL_t - \Delta). \quad (14)$$

$L_t = l + L$; 由于 $l \ll L$ 所以 $L_t \sim L$ 。

设 ϕ_r 为光热形变偏转角, 则

$$\phi_r \doteq 2 \left[-\frac{\partial u_s}{\partial r}(r, 0) \right]. \quad (15)$$

三、光热形变偏转信号的数值分析

1. 偏转信号与薄膜吸收系数的关系

薄膜的吸收是导致薄膜体系形变的根本原因, 建立一定条件下偏转信号与薄膜吸收系数的关系是非常重要的。对式(12)进行数值计算。结果表明, 当薄膜厚度很薄时 ($l \ll L_{th}$), 吸收系数在相当大的范围内, 偏转信号与薄膜吸收系数成正比。当薄膜的厚度接近热扩散长度, 吸收系数较大时, 二者的关系将与线性偏离。进一步分析表明, 在二者的关系中, 起决定作用的是薄膜吸收系数与薄膜厚度的乘积。当 $\alpha l \leq 1$ 时, 光热偏转信号。与薄膜的吸收系数成正比。这一点与体材料不同, 因为一般体材料的厚度远大于热扩散长度。光热偏转信号是否与吸收系数成正比, 取决于吸收系数与热扩散长度的乘积。图 2 给出偏转信号幅值与薄膜吸收系数的关系。图中两条曲线分别对应 $l = 1 \mu\text{m}$ 和 $l = 20 \mu\text{m}$ 。

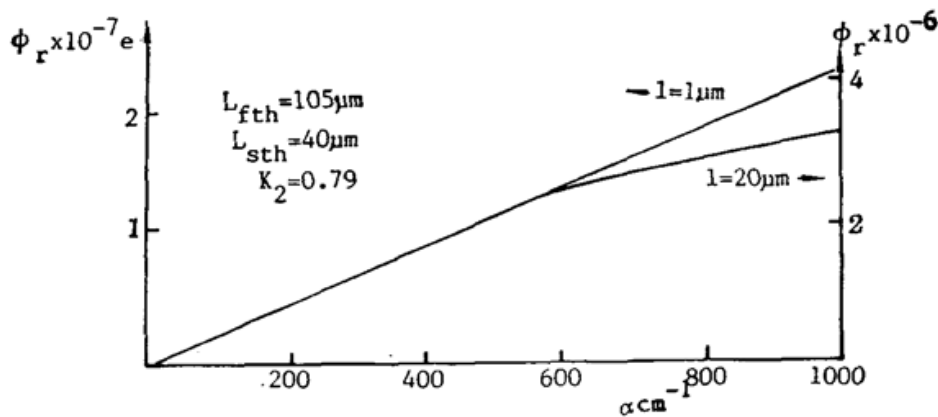


Fig. 2 The deflection signal vs absorption coefficient of optical coatings (calculated)

2. 偏转信号与薄膜厚度的关系

偏振信号与膜厚的关系的数值计算表明在吸收系数不变的条件下, 膜厚增加, 偏转信号增加。在膜厚远小于热扩散长度时, 偏转信号与膜厚呈线性关系, 随着膜厚的进一步增加, 这种关系将偏离线性, 最终将达到饱和。上面说过, 薄膜的总吸收与 $(\alpha \cdot l)$ 有关, 从这一点出发, 吸收与膜厚对偏转信号的贡献是一致的。但膜厚不仅影响薄膜吸收, 而且还影响传播到基体的热量, 所以偏转信号随膜厚的变化更为复杂。

3. 偏转信号与薄膜热参数的关系

为了研究薄膜热物性对偏转信号的影响, 我们计算了不同热导率的膜层, 在泵浦光斑内不同位置的形变斜率的变化规律, 可以看出, 尽管薄膜热导率变化很大, 斜率的最大值变化不大。这就是说, 在热薄条件下, 偏转信号仅与薄膜的吸收率有关, 而与其他特性关系不大。这一点对测量光学薄膜的吸收是很重要的。

4. 偏转信号与基体热导率的变化

在热薄薄膜的情况下, 表面形变主要是由基体的膨胀引起的, 因此, 基体的热物性对偏

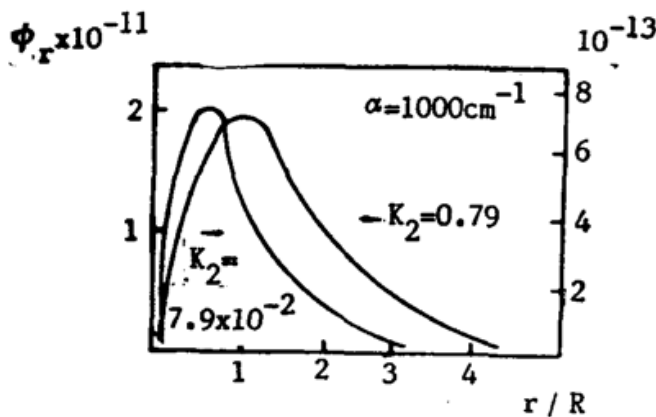


Fig. 3 The deflection signal vs probe position for different thermal conductivity of substrates

转信号的影响是很大的。图 3 给出不同热导率时, 泵浦光斑内不同位置形变斜率的变化。计算结果证实了以上结论。这里需要强调的是, 不论是图 4 还是图 5 所给出的结果都是在膜厚与热薄的条件下获得的。对于热厚膜, 情况恰恰相反。由于热量几乎全部在薄膜内衰减。薄膜的形变比基体形变大得多。这时, 基体的热物性对偏转信号没有贡献。而薄膜的热物性则是影响信号的重要因素。

5. 偏转信号与调制频率的关系

对形变斜率与调制频率的关系的数值计算表明, 随着调制频率的增加, 信号迅速衰减, 为了在更大范围内研究这种关系, 计算结果还表明, 调制频率的增加不仅使信号衰减, 还会使信号的峰值向泵浦光斑中心移动, 在低频时, 最大信号发生在高斯半径处, 而频率高于 500 Hz 后移至 0.75 高斯半径处, 之后不再变化。

四、实验研究

我们的实验装置参考文献[7], 其中, 泵浦光和探测光分别为 40 mW 和 1.5 mW 的 He-Ne 激光, 所以测量波长为 6328 Å。如果泵浦光选用另外的激光器则可对其他波长进行测试, 为了消除泵浦光和其他杂散光对测量的影响, 象限接收器前面置一小孔光阑。信号用锁相放大器放大和显示, 并用双迹示波器进行监控。下面, 我们讨论一些实验结果, 并与理论计算进行比较。

1. 偏转信号随调制频率的变化

图 4 给出偏转信号随调制频率的变化。曲线示出计算结果, × 号表示实验结果。二者是相当吻合。调制频率的选择对光热偏转测量很重要。为了获得大信号, 选择低频。为了抑制噪声, 频率选择要适当高一些。同时要避开 50 Hz 市电干扰。一般测量选在 80~110 Hz。为了探测薄膜体内局部吸收缺陷, 必须选用更高的频率。

2. 偏转信号在泵浦光斑内的分布

移动探测光束与泵浦光斑的相对位置, 则可获得泵浦光斑内不同位置的偏转信号变化。图 5 给出测量结果。图中的实线示出计算曲线, 可以看出, 二者基本是一致的。实验结果表明, 径向的不对称性是由泵浦光束与膜面的准直误差引起的。信号的次峰与泵浦光的衍射相对应, 在泵浦光路中加入空间滤波器, 可以消除这种影响。

3. 光学薄膜的弱吸收测量

我们利用该实验装置测量了光学薄膜的吸收。弱吸收的绝对测量涉及定标问题, 由以上分析可知, (1) 在相当大的范围内, 偏转信号对热薄薄膜的热物性不敏感。(2) 当 $al \ll 1$ 时,

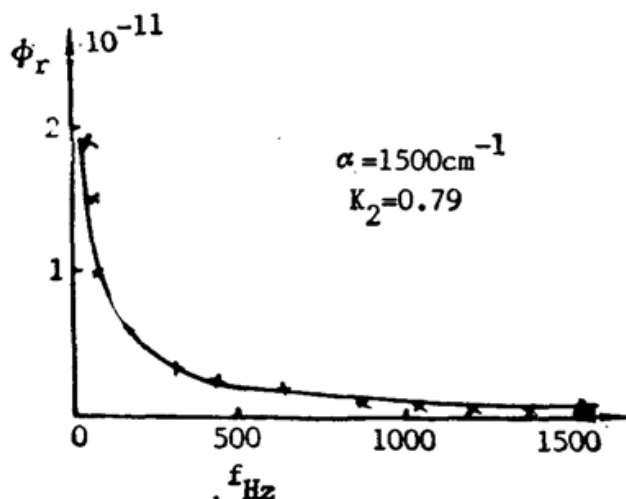


Fig. 4 The deflection signal vs modulation frequency
— calculated; × experiment

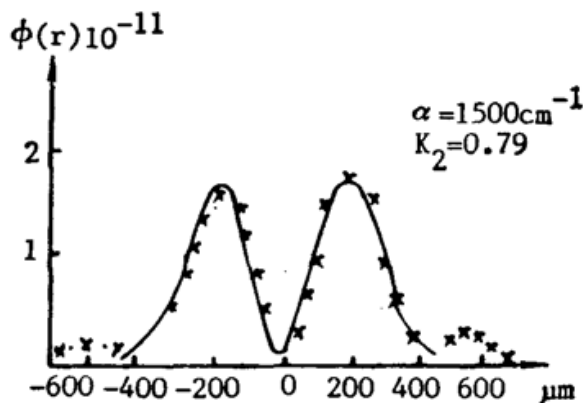


Fig. 5 The deflection signal vs probe position
— calculated; × experiment

偏转信号与薄膜吸收呈线性关系。因此可以选择吸收比较大的薄膜样品用光度测量法进行标定,定出标样,以标样为标准便可测量出各种薄膜的光吸收。表1例出几种薄膜的测量结果。

Table 1 The absorption of optical coatings measured by photo-thermal deflection technology

layer	TiO ₂ (1)	TiO ₂ (2)	SiO ₂ (1)	SiO ₂ (2)	TiO ₂ /SiO ₂ 6328Å(HR)
Ax10 ⁻⁴	9.1	9.2	3.8	4.0	1.6

五、结 论

作者对薄膜体系的光热形变偏转信号进行了理论分析和实验研究,结果表明,理论计算和实验结果是一致的。光热偏转技术在光学薄膜中是大有可为的。除了体吸收处,薄膜的表面吸收,界面吸收,和薄膜体内的吸收缺陷分布,都可以用这种方法获得。如果改变实验条件,还可以探测薄膜的热物性。对这种技术作进一步的研究,于发展薄膜光学和薄膜技术都是非常有益的。

参 考 文 献

- [1] G. Busse; *IEEE Trans. Sonic. & Ultrasonic.*, 1985, **SU-32**, No. 2 (Feb), 355.
- [2] R. Vyas *et al.*; *Appl. Opt.*, 1988, **27**, No. 18 (Sep), 3914.
- [3] A. Rosencwaig *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1983, **43**, No. 2 (Jul), 166.
- [4] 吴周令等;《光学学报》,1989, **9**, No. 8 (Aug), 741.
- [5] W. B. Jackson *et al.*; *Appl. Opt.*, 1981, **20**, No. 8 (Aug), 1333.
- [6] M. A. Olmstead *et al.*; *Appl. Phys.*, 1983, **A32**, No. 3 (Nov), 141.
- [7] 吴周令等;《光学学报》,1990, **10**, No. 4 (Apr), 369.

Analysis of photo-thermal deflection signal in optical coatings

FAN ZHENGXIU, SU XING AND WU ZHOULING

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics Academia Sinica, Shanghai 201800)

(Received 17 April 1990; revised 19 July 1990)

Abstract

The theoretical expressions of the distribution of temperature and photothermal deformation deflection signal in optical coatings are given in this paper. The relations between deflection signal and parameters of coating, substrate and modulation frequency are analysed by numerical calculation. The experimental results are compared with theoretical calculation.

Key words: optical coating, Photo-thermal deflection, absorption.