

# 用共线光热偏转技术测量光学 薄膜的微弱吸收

吴 周 令

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

唐晋发 施柏焯

(浙江大学 光仪系, 杭州)

提 要

用具有高灵敏的共线光热偏转技术研究  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{ZrO}_2$ 、 $\text{MgF}_2$ 、 $\text{ZnS}$  等单层光学薄膜的吸收特性,测得它们的吸收率。实验结果与激光量热法及横向光热偏转技术符合良好,表明共线光热偏转技术是测量光学薄膜弱吸收的较理想方法。

关键词: 光热偏转光谱术; 薄膜弱吸收。

## 一、引 言

我们曾提出用横向光热偏转技术 (TPDS) 测量光学薄膜的微弱吸收并报道了初步的实验结果<sup>[1]</sup>。TPDS 方法是一种较好的研究光学薄膜吸收特性的方法,但这种方法以样品表面附近空气层为耦合介质,不仅使灵敏度受到一定限制(气体介质折射率温度系数  $dn/dT$  较固体要低一个量级),而且实验结果受环境(如气流扰动)影响较大。另外,TPDS 法在实际测量中对泵浦光束、探测光束以及样品三者之间的相对位置的布置要求较高,调整过程相对要复杂一些,因而重复性较差。本文报道用共线光热偏转技术(CPDS)研究光学薄膜吸收特性的实验结果,这种方法以玻璃基底为光热偏转耦合介质,一定程度上克服了上述 TPDS 技术的不足。

## 二、测量原理

样品受强度调制的激光束(泵浦光束)照射的,光吸收的存在将在样品内部产生热波,从而在样品及其周围介质内形成周期性梯度折射率分布,当另一束激光束(测量光束)通过这一梯度折射率区域时,其方向将发生相应的周期性偏转。使用象限探测器探测这一偏转,分析所得结果即可获得关于样品光吸收的信息。共线光热偏转技术是指探测光与泵浦光近似共轴的情形,如图 1 所示。

设样品是折射率为  $n_1$  的单层光学薄膜,基底折射率为  $n_2$ ,实验时样品置于空气中(折射

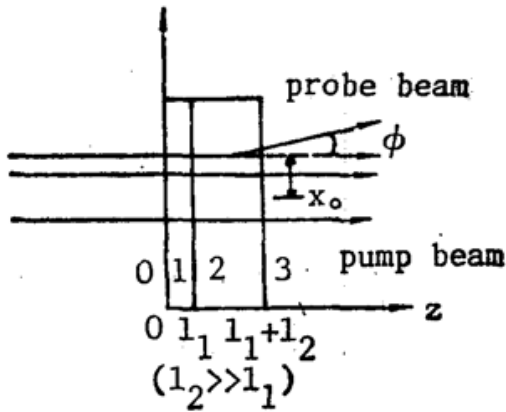


Fig. 1 Geometry of CPDS

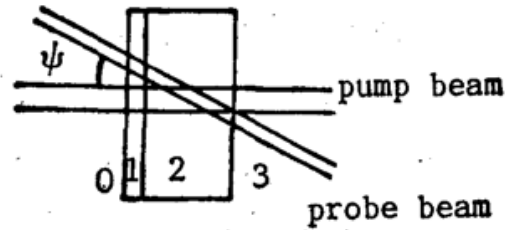


Fig. 2 Thermal wave in substrate causes OBD signal

率为  $n_0$ ), 则由光线在非均匀介质中的传播规律<sup>[2]</sup>可得探测光束偏转角  $\phi$  表达式如下:

$$\phi = \sum_{i=0}^3 \frac{1}{n_i} \frac{dn}{dT} \int_{S_i} \nabla_{\perp} T_i(\mathbf{r}, t) ds_i \quad (1)$$

式中  $n_i$  是介质  $i$  的折射率,  $dn_i/dT$  是介质  $i$  的折射率温度系数,  $S_i$  是探测光束在介质  $i$  中的传播路径,  $T_i(\mathbf{r}, t)$  是介质  $i$  中的温度场分布,  $\nabla_{\perp} T_i(\mathbf{r}, t)$  是介质  $i$  中与探测光传播方向相垂直方向的温度梯度。实验中为避免泵浦光直射到象限探测器上, 通常须使探测光与泵浦光有一交角  $\psi$ , 如图 2 所示, 在这种情况下, 适当调整探测光与泵浦光的相对位置, 使它们的重叠仅发生在基底内部, 则(1)式简化如下:

$$\phi = \frac{1}{n_2} \frac{dn_2}{dT} \int_{S_2} \nabla_{\perp} T_2(\mathbf{r}, t) ds_2 \quad (2)$$

式中  $T_2(\mathbf{r}, t)$  满足热传导方程<sup>[3]</sup>

$$\begin{cases} \nabla^2 T_0 - \frac{1}{k_0} \frac{\partial T_0}{\partial t} = 0 & \text{区域 0,} \\ \nabla^2 T_1 - \frac{1}{k_1} \frac{\partial T_1}{\partial t} = -\frac{Q(\mathbf{r}, t)}{K_1} & \text{区域 1,} \\ \nabla^2 T_2 - \frac{1}{k_2} \frac{\partial T_2}{\partial t} = 0 & \text{区域 2.} \end{cases}$$

及边界条件

$$\begin{cases} T_0|_{z=0} = T_1|_{z=0}, T_1|_{z=l_1} = T_2|_{z=l_1}, \\ K_0 \frac{\partial T_0}{\partial z} \Big|_{z=0} = K_1 \frac{\partial T_1}{\partial z} \Big|_{z=0}, K_1 \frac{\partial T_1}{\partial z} \Big|_{z=l_1} = K_2 \frac{\partial T_2}{\partial z} \Big|_{z=l_1}. \end{cases}$$

其中  $K_i$  是热导率,  $k_i$  是热扩散系数,  $Q(\mathbf{r}, t)$  是热源, 这里假定薄膜(区域, 内介质)的光吸收是唯一热源, 则

$$Q(\mathbf{r}, t) = \frac{P\alpha}{2\pi a^2} \exp(-r^2/a^2) \exp(-\alpha z) \cos \omega t.$$

式中  $P$  是泵浦光功率,  $a$  是高斯光束半径,  $\omega$  是调制频率,  $\alpha$  是介质 1 的光吸收系数。至此, 我们已获得光热偏转信号与样品吸收之间的关系, 显然, 这一关系是较为复杂的。

考虑在较低调制频率下弱吸收光学薄膜属所谓热薄试样<sup>[4]</sup> ( $l_1 < \mu_s < \mu_a$ , 式中  $l_1$  为样品厚度, 通常为几千埃量级,  $\mu_s$  为样品热扩散长度, 在调制频率  $f = 120 \text{ Hz}$  时为几十至几百微米量级,  $\mu_a$  为样品光吸收长度) 且有  $1 - e^{-\alpha l_1} \simeq \alpha l_1$ , (2) 式可简化为:

$$\phi \approx \frac{1}{n_2} \frac{dn_2}{dT} C_1 \alpha_1 P. \quad (3)$$

式中  $C_1$  在实验条件确定和薄膜近似<sup>[6]</sup>的情况下是一常数, 与样品特性无关。实验中用一象限探测器来检测光热偏转角  $\phi$ , 则有:

$$\frac{\Delta V}{V} = C_2 \phi. \quad (4)$$

式中  $\Delta V$  为象限探测器的差动输出信号,  $V$  为象限探测器两象限直流输出之和,  $C_2$  为象限探测器响应函数, 在实验条件确定的情况下是一常数。合并(3)、(4)两式可得:

$$\frac{\Delta V}{V} = C P_s. \quad (5)$$

式中  $C = \frac{1}{n_2} \frac{dn_2}{dT} C_1 C_2$  是一仅决定于样品基底及实验条件的常数,  $P_s = \alpha_1 P$  是样品吸收的光能量。与 TPDS 法<sup>[1]</sup>相似, 本研究仍以真空镀制的碳膜为定标样品进行定标, 其原理: 只要基底相同并且测量中保证实验参数不变, 则(5)式对定标样品同样适用, 故有:

$$\left(\frac{\Delta V}{V}\right)_0 = C P_{s0}. \quad (6)$$

把(5)、(6)两式相除并整理可得:

$$P_s = \left(\frac{\Delta V}{V}\right) / \left(\frac{\Delta V}{V}\right)_0 \cdot P_{s0}. \quad (7)$$

上式两边同时除以泵浦光入射功率  $P$ , 即得待测样品吸收率表达式:

$$A = \left(\frac{\Delta V}{V}\right) / \left(\frac{\Delta V}{V}\right)_0 \cdot P_{s0}. \quad (8)$$

式中  $A_0$  为定标样品的吸收率, 它由光度法<sup>[5]</sup>(忽略散射的影响)进行精密测定。

### 三、实验、结果及讨论

图 3 为本文实验装置示意图。泵浦光束 A (He-Ne, 最大输出功率 120 mW) 经斩波器 9 后由反射镜 1, 2 确定方向, 经透镜 3 聚焦后入射至样品 4 的表面。B 为探测光束 (He-Ne, 最大输出功率为 2 mW), 它由反射镜 5 确定方向, 经透镜 6 聚焦后在样品基底内与泵浦光相交。光热偏转信号由象限探测器 7 接收后输入锁相放大器进行相关检测。分束镜 B. S. 分出的激光束入射至功率计 8, 用于监测泵浦光功率的漂移, 以修正相关项引入的误差。

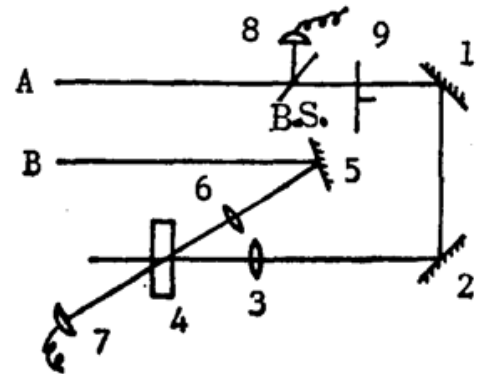


Fig. 3 Experimental system of CPDS

用图 3 所示的实验装置测量了几种单层光学薄膜在  $\lambda = 6328 \text{ \AA}$  时的吸收率  $A$ , 并由此计算出了相应材料在薄膜状态下的消光系数  $K$ <sup>[6]</sup>, 结果及其与激光量热法 (LO)<sup>[7]</sup>、TPDS 法<sup>[1]</sup> 的比较列于表 1。

由表 1 可以看出, CPDS 法所得结果与其它方法符合良好, 说明了该方法的可行性。影响本系统测量精确度的误差源主要有三项: 原理误差、定标样品测量误差, CPDS 系统的重复精度。原理误差来源于为实现系统定标而做的热薄近似, 属系统误差。在本实验条件下,

Table 1 Measured results of several optical coatings

sample		SiO <sub>2</sub>	ZrO <sub>2</sub>	MgF <sub>2</sub>	ZnS	Au
CPDS	A	1.82×10 <sup>-4</sup>	5.70×10 <sup>-4</sup>	6.23×10 <sup>-4</sup>	3.15×10 <sup>-3</sup>	
	K	2.98×10 <sup>-5</sup>	1.13×10 <sup>-4</sup>	1.00×10 <sup>-4</sup>	6.76×10 <sup>-4</sup>	
TPDS	A	1.73×10 <sup>-4</sup>	5.29×10 <sup>-4</sup>	5.94×10 <sup>-4</sup>	2.90×10 <sup>-3</sup>	30.58%
	K	2.83×10 <sup>-5</sup>	1.05×10 <sup>-4</sup>	9.53×10 <sup>-5</sup>	6.22×10 <sup>-4</sup>	
LC	K	3.10×10 <sup>-5</sup>	1.21×10 <sup>-4</sup>	1.10×10 <sup>-4</sup>		32.41%**

\*  $\lambda=5145 \text{ \AA}$ .\*\* A volum,  $T \approx 0$ .

该项误差对大多数单层氧化物介质膜样品, 小于 18%, 对氟化物约为 14%, 而对热导率相对较低的溴化物及 SiO<sub>2</sub> 等, 小于 10%<sup>[8]</sup>。

定标样品测量误差指定标样品吸收率的测量精度, 属系偶误差。本文实验条件下, 在忽略很小的散射分量时, 该项误差小于 0.5%。为获得 CPDS 系统的重复精度(此项误差为偶然误差), 实验中以 ZrO<sub>2</sub> 膜为例进行了 10 次重复测量, 在消除了泵浦光功率漂移带来的影响后, 算得平均吸收率值为  $5.70 \times 10^{-4}$ , 最大偏差为  $0.23 \times 10^{-4}$ , 相当于优于 4% 的重复精度。

以上分析表明, 本装置用于不同单质层介质膜的测量, 总误差不超过 14%~22%, 这对  $10^{-8} \sim 10^{-6}$  量级的小吸收测量来说, 是完全可以接受的。

系统检测灵敏度取决于系统的总噪声。实验中对 ZrO<sub>2</sub> 样品 ( $A \sim 10^{-4}$ ) 所得信号为  $\Delta V = 0.4 \text{ mV}$  ( $V = 6.24 \text{ V}$ )。此时挡住泵浦光束, 测得  $\Delta V_{\text{噪}} \leq 1 \mu\text{V}$  ( $V = 6.24 \text{ V}$ ), 此即为系统总噪声的有效值。由以上结果可推算该 CPDS 系统的检测限为  $A_{\text{min}} \sim 10^{-6}$ 。必须指出的是, 本文实验装置目前尚未采取良好的气流屏蔽和隔震措施, 稳定性和灵敏度受到一定影响。表 1 所列结果, 是在夜间实验完全密封的情况下获得的, 这种由于装置的不完善而对环境提出的苛刻要求, 正在改进之中。

#### 四、结 束 语

本文用相当简单的高灵敏的透射式共线光热偏转技术实现了光学薄膜微弱吸收率的测量, 其结果与激光量热法及 TPDS 法的结果符合得很好, 说明了该方法的可行性。

系统检测灵敏度达  $10^{-6}$ , 精确度优于 22% 已可满足测量光学薄膜弱吸收率的使用要求。

作者感谢范正修副研究员在整个工作过程中给予的热情关怀和指导, 感谢胡凯、何捷、吕中良等同志有益帮助和讨论。

#### 参 考 文 献

- [1] 吴周令等;《光学学报》, 1988, 8, No. 11 (Dec), 1044.
- [2] L. W. Casperson; *Appl. Opt.*, 1973, 12, No. 12 (Jun), 2434.
- [3] W. C. Jackson *et al.*; *Appl. Opt.*, 1981, 20, No. 8 (Apl), 1333.
- [4] J. C. Murphy *et al.*; *Appl. Phys.*, 1980, 51, No. 9 (Sep), 4580.
- [5] T. F. Deutsch; *J. Electron. Mater.*, 1975, 4, No. 3 (Mar), 663.
- [6] H. E. Bennet *et al.*; *J. O. S. A.*, 1980, 70, No. 3 (Mar), 268.

- [7] S. Z. Jin, J. F. Tang; *Appl. Opt.*, 1987, **26**, No. 12 (Jun), 2407.  
[8] 胡凯等;《庆祝浙大建校九十周年科学论文报告会光仪系专辑》, (浙江大学图书馆, 1987年4月), 119.

## Measurement of weak absorption of optical coatings by collinear photothermal deflection technique

WU ZHOULING

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

TANG JINFA AND SHI BAIXUAN

(*Department of Optical Instruments, Zhejiang University, Hangzhou*)

(Received 5 April 1988; revised 23 January 1989)

### Abstract

Weak absorption of optical coatings is measured by collinear photothermal deflection spectroscopy with a sensitivity as high as  $10^{-6}$ . The experimental results are in good agreement with those measured by a laser calorimeter and those by the transverse photothermal deflection method.

**Key words:** photothermal deflection spectroscopy; weak absorption.