

多层介质膜的体吸收与界面吸收研究

吴周令 范正修

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

提 要

以 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 膜系为例,报道了用横向光热偏转技术研究多层介质膜体、面吸收的实验方法与实验结果。文中对实验结果作了分析讨论并把它与文献报道的光声法作了比较。

关键词: 薄膜体、面吸收;光热偏转技术。

一、引 言

光学薄膜的吸收损耗由体吸收与界面吸收两大部分组成。测量中正确区分这两部分吸收,有助于认清光学薄膜的损耗机理,从而提高薄膜光学质量^[1,2]。

对于单层介质膜,利用楔板状样品,体、面吸收的区分可通过激光量热法^[3,4]、光声法^[5,6]或光热偏转技术^[7]来实现。对于多层介质膜,问题较为复杂,目前可见的少量报道,仅限于光声法^[8~10]。

本文提出用横向光热偏转技术^[11~14]研究多层介质膜的体、面吸收,以 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 膜系为例,报道了有关实验方法与实验结果。文中对实验结果作了分析讨论并把它与光声法进行了比较。

二、实验方法与理论分析

1. 多层介质膜总吸收的测量

多层介质膜总吸收的测量采用横向光热偏转技术,其基本原理是:多层介质膜在较低调制频率下层所谓热薄试样^[12]($l_0 < \mu_s < \mu_a$, 式中 l_0 ——样品厚度, μ_s ——样品热扩散长度, μ_a ——样品光吸收长度),在这种情况下,光热偏转信号 S 满足^[13]:

$$S = CA, \quad (1)$$

式中: A ——被测光学薄膜总吸收; C ——决定于实验条件的常数。具体的测量方法及实验装置文献^[14]中已作详细介绍,这里不再赘述。

2. 多层介质膜总吸收与膜层体、面吸收的关系

考察图1所示的多层介质膜系,有

$$A = A_V + A_{AF} + A_{HL} + A_{LH} + A_{FS} + A_S, \quad (2)$$

式中: A_V 是膜层体内吸收, A_{AF} 是空气-薄膜界面吸收, A_{HL} 是高折射率材料-低折射率材

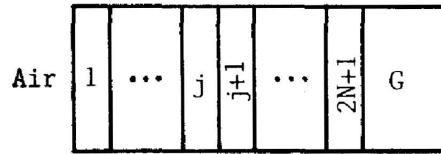


Fig. 1 Schematic diagram of the dielectric multilayer sample, consisting of $2N+1$ layers deposited on substrate G

料界面吸收, A_{LH} 是低折射率材料-高折射率材料界面吸收, A_{FS} 是薄膜-基板界面吸收, A_s 是基板吸收。

为简化分析起见, 设该膜系为奇数层 $\lambda_0/4$ 多层介质高反膜, 即有

$$l_1 = l_3 = \dots = l_{2N+1} = \frac{1}{n_H} \cdot \frac{\lambda_0}{4}, \quad l_2 = l_4 = \dots = l_{2N} = \frac{1}{n_L} \cdot \frac{\lambda_0}{4}.$$

其中 $l_i (i=1, 2, \dots, 2N+1)$ 为第 i 层膜的几何厚度。当基板无吸收且 N 足够大时, 式(2)可简化为^[1]

$$A = A_V + A_{HL}. \quad (3)$$

且有

$$A_V = \frac{\lambda_0}{2} (\alpha_L + \alpha_H) \frac{1}{n_H^2 - n_L^2}, \quad (4)$$

$$A_{HL} = 4\alpha_{HL} \frac{1}{n_H^2 - n_L^2}, \quad (5)$$

式中: α_L ——低折射率膜的体吸收系数; α_H ——高折射率膜的体吸收系数; α_{HL} ——高折射率材料-低折射率材料界面比吸收。

实验中为了从总吸收 A 的测量结果中获得体、面吸收方面的信息, 必须适当选择膜系中高、低折射率膜层的厚度^[10]。为此, 我们假设图 1 所示膜系中单层高、低折射率膜层的厚度分别为

$$n_H l_H = (2p+1) \frac{\lambda_0}{4}, \quad n_L l_L = (2q+1) \frac{\lambda_0}{4}, \quad p, q = 1, 2, \quad (6)$$

则(3)~(5)式演变为

$$\begin{aligned} A(q, p) &= \frac{4\alpha_{HL}}{n_H^2 - n_L^2} + \frac{(2q+1)\lambda_0}{2(n_H^2 - n_L^2)} \alpha_L + \frac{(2p+1)\lambda_0}{2(n_H^2 - n_L^2)} \alpha_H \\ &= A_{HL} + A_V(q) + A_V(p) \\ &= A_{HL} + A_V(q, p), \end{aligned} \quad (7)$$

式中: $A(q, p)$ ——对应于参数 (q, p) 的膜层总吸收; $A_V(q, p)$ ——对应于参数 (q, p) 的膜层体吸收。(7)式是一个三元方程。理论上讲只要测出三个不同 (q, p) 值对应的 $A(q, p)$, 即可求得 α_{HL} , α_L 及 α_H 。实际测量中为提高精度, 可选取 $n (n > 3)$ 个不同的 (q, p) 值, 然后测出相应的 $A(q, p)$, 由测得结果用曲线拟合法求出 α_{HL} , α_L 及 α_H ; 也可多取几个 (q, p) 值, 然后分组由(7)式求得所需结果, 再取平均值。

三、实验结果及讨论

表 1 列出了被测 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 膜系的设计参数, 沉积工艺及相应总吸收的测量结果。

如果把这些结果用三维图形表示, 例如图 2 所示。图 2 中: (1) $A, B, C(A, E, F)$ 三点近似在同一直线上, 表明: 在低(高)折射率膜层厚度一定时, $A(q, p)$ 与高(低)折射率膜层厚

Table 1 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ multilayers and the total absorption measured at $\lambda_0=6328 \text{ \AA}$

design	$A(q, p) \times 10^4$	refractive index	deposition method
$A/(\text{HL})^3\text{H}/\text{G}$	$\left. \begin{matrix} q=0 \\ p=0 \end{matrix} \right\} 6.9 \pm 0.6$	$n_H=2.40$ $n_L=1.46$	electron beam evaporation deposition pressure (2~3) $\times 10^{-5}$ Torr
$A/(\text{3HL})^3\text{3H}/\text{G}$	$\left. \begin{matrix} q=0 \\ p=1 \end{matrix} \right\} 10.0 \pm 1.4$		
$A/(\text{H3L})^3\text{H}/\text{G}$	$\left. \begin{matrix} q=1 \\ p=0 \end{matrix} \right\} 7.1 \pm 0.8$		
$A/(\text{3H3L})^3\text{3H}/\text{G}$	$\left. \begin{matrix} q=1 \\ p=1 \end{matrix} \right\} 10.3 \pm 1.5$		
$A/(\text{5HL})^5\text{H}/\text{G}$	$\left. \begin{matrix} q=0 \\ p=2 \end{matrix} \right\} 13.2 \pm 2.1$		
$A/(\text{H5L})^5\text{H}/\text{G}$	$\left. \begin{matrix} q=2 \\ p=0 \end{matrix} \right\} 7.3 \pm 0.9$		

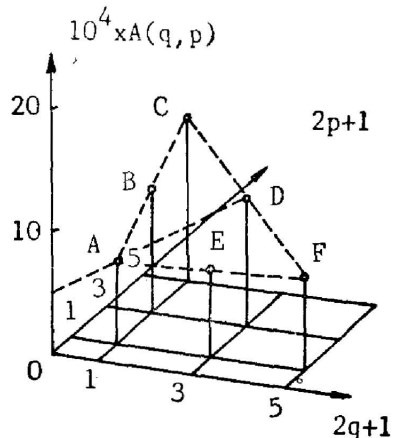


Fig. 2 Measured total absorption $A(p, q)$ of $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ coatings vs. the optical thickness of their high and low refracting components at $\lambda = \lambda_0 = 6328 \text{ \AA}$

度成正比。

(2) 直线 A, B, C (A, E, F) 的斜率是与 α_H (α_L) 成正比的量, 反映着 α_H (α_L) 的大小。

(3) 直线 DA 在纵坐标轴上的截距是与 a_{HL} 成比例的量, 表征着 a_{HL} 的大小。

表 2 列出了对表 1 数据的处理结果及其与文献报道结果(光声法)^[10] 的比较。

由表中可以看出:

1. 对所研究的 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 膜系, 有:

(1) $\alpha_H \gg \alpha_L$, 即高折射率介质体吸收是膜系总的体吸收的主要来源;

(2) $A_{HL} \gtrsim A_V(q, p)$, 说明界面吸收是膜系总吸收有着重要贡献。

因此, 在 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 膜系的设计与制造过程中, 要降低其吸收损耗, 关键在于界面吸收与高折射率介质体吸收的减小。

2. 本文处理数据时未考虑所谓“膜内界面”(intra-interface)^[15] 对薄膜总吸收的影响, 但其结果与光声法在 $\delta=0.75$ 时的结果^[10] 符合较好, 说明: 对于本文所测样品, 由于“膜内界面”而引入的附加吸收是可以忽略的力量。这个结论与我们具体镀膜工艺是相符的——在我们的样品制备过程中, 高、低折射率膜层厚度的增长都是连续控制的, 故所谓“膜内界面”实际上并不存在。

四、结 束 语

我们通过适当选取高、低折射率膜层的厚度, 用高灵敏度的横向光热偏转技术详细地研

Table 2 Calculated α_L , α_H , a_{HL} and $A_{HL}/A_V(q, p)$ of the $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ coatings in comparison with previous data

parameter	our results	previous	data ^[10]
		$\delta=0^*$	$\delta=0.75^*$
$\alpha_L(\text{cm}^{-1})$	1.3 ± 0.2	1.1 ± 2	1.1 ± 2
$\alpha_H(\text{cm}^{-1})$	18 ± 3.6	52 ± 4	23 ± 10
$a_{HL} \times 10^4$	4.7 ± 0.5	1.1 ± 0.3	2.0 ± 0.6
$A(0, 0) \times 10^4$	6.9 ± 0.6		6.0 ± 0.6
$A_{HL} \times 10^4$	5.2 ± 0.5		4.3 ± 0.4
$A_V(0, 0) \times 10^4$	1.7 ± 0.3		1.7 ± 0.2
$A_V(0, 1) \times 10^4$	4.8 ± 0.9		
$A_V(1, 0) \times 10^4$	1.9 ± 0.3		
$A_V(1, 1) \times 10^4$	5.1 ± 1.0		
$A_V(0, 2) \times 10^4$	8.0 ± 1.6		
$A_V(2, 0) \times 10^4$	2.1 ± 0.4		
$A_{HL}/A_V(0, 0)$	3.1 ± 0.8		2.5 ± 0.6
$A_{HL}/A_V(0, 1)$	1.1 ± 0.3		
$A_{HL}/A_V(1, 0)$	2.7 ± 0.7		
$A_{HL}/A_V(1, 1)$	1.0 ± 0.3		
$A_{HL}/A_V(0.2)$	0.7 ± 0.2		
$A_{HL}/A_V(2, 0)$	2.5 ± 0.7		

* $\delta=0$ —taking no account of the influence of “intra-interface”^[15].

$\delta=0.75$ —taking into account of the influence of “intra-interface”.

究了 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 膜系的体吸收与界面吸收, 得出了一些有意义的结论。这些结论有助于进一步认识光学薄膜的损耗及激光损伤机理。

作者感谢施柏焯、何捷、胡凯、苏星等同志的有益帮助和讨论。

参 考 文 献

- [1] H. E. Bennet *et al.*; *J. O.S. A.*, 1980, **70**, No. 3 (Mar), 268.
- [2] A. Kalb; *Opt. News*, 1986, **12**, No. 8 (Aug), 13.
- [3] J. Ebert; *J. O. S. A.*, 1981, **71**, No. 12 (Dec), 1553.
- [4] P. A. Temple; *Opt. Eng.*, 1984, **23**, No. 2 (May), 326.
- [5] N. C. Fernelius *et al.*; *Appl. Surf. Sci.*, 1981, **7**, No. 1 (Jan), 32.
- [6] F. Coriand *et al.*; *Thin Solid Films*, 1985, **130**, No. 12 (Aug), 29.
- [7] 吴周令等;《光学学报》, 1989, 待发表。
- [8] J. Fujii *et al.*; *Japan. J. A. P.*, 1981, **20**, (Feb), 361.
- [9] M. Morita; *Japan. J. A. P.*, 1981, **20**, (May), 835.
- [10] H. G. Walther *et al.*; *Thin Solid Films*, 1986, **142**, No. 1 (Aug), 27.
- [11] W. C. Jackson *et al.*; *Appl. Opt.*, 1981, **20**, No. 8 (Apr), 1333.
- [12] J. C. Murphy *et al.*; *J. Appl. Phys.*, 1980, **51**, No. 9 (Sep), 4580.
- [13] N. M. Amer *et al.*; 《Semiconductors and Semimetals》, **21** (B), (ed by Panrkv., 1985), 83.
- [14] 吴周令等;《光学学报》, 1988, **8**, No. 11 (Nov), 1044.
- [15] P. Roche *et al.*; *J. O. S. A.*, 1984, **1**, No. (Oct), 1032.

Measurement of bulk and interface absorption in Multilayer coatings

WU ZHOULING AND FAN ZHONGXIU

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

(Received 20 July 1988; revised 7 November 1988)

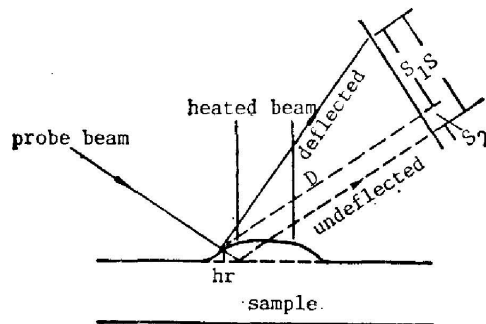
Abstract

By an appropriate variation in the thickness of the high and low refracting components, a the bulk and interface absorption of dielectric $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ multilayer stacks was investigated using transverse photothermal deflection technique. The results are in good agreement with those previously reported using photoacoustic method.

Key words: volume and interface absorption of multilayer coatings; photothermal deflection technique .

更 正

本刊 1989 年第 3 期上《方波调制时的光热光束偏转理论》一文有以下一些更正:



1. 图 1 (见附图)
2. p.253 第 8 行“(光强点)”应为“(1/e 光强点)”
3. p.253 式(7)中 $\frac{1}{K+h}$ 应为 $\frac{1}{K_{ph}}$
4. p.254 倒数第 2 行“表面做倾斜度”应为“表面倾斜度”
5. p.257 图 6 中的“(a=1)”应为“(a=100μm)”。

特此向作者、读者致歉!

光学学报编辑部