

利用激光光声技术测量多层介质的埋层性质

孙洪伟 沈 俊 张国民 黄孟才

(苏州大学中心实验室 苏州 215006)

1992年3月2日收到

摘要 本文提出了一种表面层为强吸收层的多层介质的光声理论模型,测量了多层金属样品埋层的热扩散率,热传导率及厚度,实验结果与理论很好地符合.表明光声检测在亚表面物性测量方面是一种十分有效的手段.

Photoacoustic measurement of thermal properties and thickness of buried layers at multilayer film

SUN Hongwei SHEN Jun ZHANG Guoming HUANG Mengcai

(Central Laboratory, Suzhou University)

Received February 2, 1992

Abstract The photoacoustic model of multilayer with a strong-absorbing surface layer is developed. The phase of photoacoustic signal has been measured as a function of modulated frequency using apparatuses that are all controlled by a computer system. The thermal diffusivity, effusivity as well as thickness of several buried layers are obtained independently through best fit of experimental data according to the theoretical model. The multilayers of thin metal and alloy film are investigated and the results show agreement with literature values. This method is proved to be particularly valuable in nondestructive examinations of subsurface physical properties.

一、引 言

光声信号直接和被测样品的光学吸收性质,热学性质以及几何性质有关,在不同的调制频率下,光声信号来自于不同深度的样品部分^[1],所以,应用光声检测技术可以测量层状样品随深度非均匀变化的光学和热学性质,而且可以根据各层样品物理性质的不同得到各层的厚度,然而传统的热学测量方法难以得到多层复合薄膜样品中各层材料的热学性质,尤其是埋层的性质,光声检测技术具有很大的优越性^[2].另外,多层薄膜材料的厚度测量也是薄膜研究的重要课题^[3~4]. Adamas^[5], Y. Sugitani^[6], P. Chaprentier^[7]以及 O. Pessoa^[8]等人都曾采

用各种光声方法测量了单层样品的一个或二个热学参数,但这些工作仅局限于检测某一层样品(通常是表面层)的某一个热学参数或厚度,对多层介质尤其是埋层的热学参数与厚度的测量尚未进行很多研究,而这恰好是最有意义的.建立合适的光声理论模型对多层介质的检测是十分重要的.而以前的多层模型(J. Opsal 和 A. Rosenwaiy^[9])形式复杂,很难直接应用,而且忽略了光吸收在一定的深度范围内发生的事实.本文提出了一种表面层为强吸收层的多层理论模型,光吸收仅在表面层内进行,而热波能传递到以下各层样品,从而使光声信号和埋层介质的光学吸收性质没有关系,可以在光学性质未知的情况下,独立地测量埋层介质的热学参数及厚度,从实验上讲,此方法还可以避免样品表面杂散光对测量的影响.提高信噪比,另外光声信号的强度随调制频率的增大而减小,采用该方法可以充分利用小功率激光光源($<10\text{mw}$)的入射能量,拓宽实验测量的调制频率范围,在 $400\text{Hz} > f > 200\text{Hz}$ 的情况下还能保证得到稳定的相位信号,通过测量光声信号相位与调制频率的关系,测得了多层金属材料埋层的热扩散率、热传导率及厚度.

二、理论模型

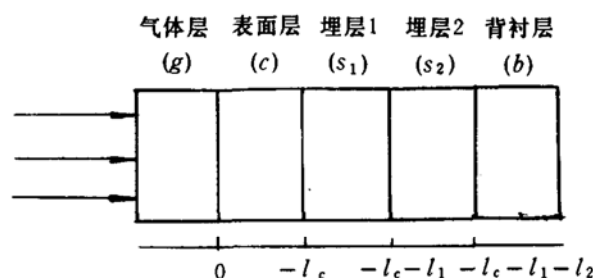


图1 多层样品示意图

考虑一个多层样品,其结构如图1所示.其中包括空气层 g ,其长度与样品层相比足够长;表面层 c ,样品层 s_1, s_2 ,它们的厚度分别为 l_c, l_1, l_2 ;还有背衬材料 b .一束被调制的激光束入射到表面层,则表面层内深度为 x 的样品处的分布热源 $Q(x, t) = \beta I_0 e^{\beta x} (1 + e^{i\omega t})$, $\beta (\text{cm}^{-1})$ 是表面层的光吸收系数,由于表面层足够厚,光吸收仅在表面层内进行,则其它各层样品内不存在分布热源.各区域内的各点温度由以下热传导方程决定:

$$\begin{cases}
 \frac{\partial^2 \theta_g}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha_g} \frac{\partial \theta_g}{\partial t} & (x > 0) & (1) \\
 \frac{\partial^2 \theta_c}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha_c} \frac{\partial \theta_c}{\partial t} - A e^{\beta x} (1 + e^{i\omega t}) & (-l_c < x < 0) & (2) \\
 \frac{\partial^2 \theta_1}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha_1} \frac{\partial \theta_1}{\partial t} & (-l_c - l_1 < x < -l_c) & (3) \\
 \frac{\partial^2 \theta_2}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha_2} \frac{\partial \theta_2}{\partial t} & (-l_c - l_1 - l_2 < x < -l_c - l_1) & (4) \\
 \frac{\partial^2 \theta_b}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha_b} \frac{\partial \theta_b}{\partial t} & (x < -l_c - l_1 - l_2) & (5)
 \end{cases}$$

式中: α_n ($n=g, c, 1, 2, b$) 分别为各层的热扩散率, $A=\beta I_0 \eta / 2K_c$, η 是吸收层内吸收的光能通过无辐射去激励转变成热能的效率, K_c 是表面层 c 的热传导率.

若忽略瞬态解, 则各区域温度场的一般解为:

$$\begin{cases} Q_g(x, t) = A_{1g}x + A_{2g} + h_g e^{\sigma_g x} e^{i\omega t} \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} Q_c(x, t) = A_{1c}x + A_{2c} + \left(d_1 e^{\sigma_c x} + d_2 e^{-\sigma_c x} - \frac{A}{\beta^2 - \sigma_c^2} e^{\beta x} \right) e^{i\omega t} - \frac{A}{\beta^2} e^{\beta x} \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} Q_1(x, t) = A_{s1}x + A'_{s1} + (h_{s1} e^{\sigma_1 x} + h'_{s1} e^{-\sigma_1 x}) e^{i\omega t} \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} Q_2(x, t) = A_{s2}x + A'_{s2} + (h_{s2} e^{\sigma_2 x} + h'_{s2} e^{-\sigma_2 x}) e^{i\omega t} \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} Q_b(x, t) = A_b x + A'_b + h_b e^{\sigma_b x} e^{i\omega t} \end{cases} \quad (10)$$

式中 $A_{1g}, A_{2g}, A_{1c}, A_{2c}, A_{s1}, A'_{s1}, A_{s2}, A'_{s2}$ 是实值常数, $h_g, h_b, d_1, d_2, h_{s1}, h'_{s1}, h_{s2}, h'_{s2}$ 都是复值常数, $\sigma_i = (1+i)\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha_i}}$ ($i=g, c, b, 1, 2$), 将边界条件分别应用于解的直流分量和正弦分量, 则可以得到各系数, 其中样品表面 ($x=0$) 的周期性温度变化的复数振幅 h_g 决定了光声信号的大小和相位:

$$\begin{aligned} \theta_c(0, t) &= h_g \\ &= \frac{-E}{D} \left[(1-b)(1+\frac{1}{s})e^{-2\sigma_2 l_2} - (1+b)(1-\frac{1}{s}) \right] \\ &\quad \left[(1-r)(1-\frac{1}{c})e^{\sigma_c l_c} + (1+r)(1+\frac{1}{c})e^{-\sigma_c l_c} - 2E^+ \right] \\ &\quad - \frac{E}{D} \left[(1-b)(1-\frac{1}{s})e^{-2\sigma_2 l_2} - (1+b)(1+\frac{1}{s}) \right] \\ &\quad \times \left[(1-r)(1+\frac{1}{c})e^{\sigma_c l_c} + (1+r)(1-\frac{1}{c})e^{-\sigma_c l_c} - 2E^- \right] e^{2\sigma_1 l_1} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \text{式中: } D &= \left[(1-b)(1+\frac{1}{s})e^{-2\sigma_2 l_2} - (1+b)(1-\frac{1}{s}) \right] \\ &\quad \times \left[(1+g)(1-\frac{1}{c})e^{\sigma_c l_c} + (1-g)(1+\frac{1}{c})e^{-\sigma_c l_c} \right] \\ &\quad + \left[(1-b)(1-\frac{1}{s})e^{-2\sigma_2 l_2} - (1+b)(1+\frac{1}{s}) \right] \\ &\quad \times \left[(1+g)(1+\frac{1}{c})e^{\sigma_c l_c} + (1-g)(1-\frac{1}{c})e^{-\sigma_c l_c} \right] e^{2\sigma_1 l_1} \end{aligned}$$

$$A = \frac{\beta I_0 \eta}{2K_c}, E = \frac{A}{\beta^2 - \sigma_c^2}, b = \frac{e_b}{e_2}, g = \frac{e_g}{e_c}, s = \frac{e_2}{e_1}, c = \frac{e_1}{e_c}, r = (1-i)\beta/2ac$$

$a_c = \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha_c}}, E^+ = (1+\frac{r}{c})e^{-\beta l_c}, E^- = (1-\frac{r}{c})e^{-\beta l_c}, e_n$ ($n=1, 2, c, b, g$) 是各层的热流常数, 它和热扩散率 α , 热传导率 K 的关系为:

$$e = K / \sqrt{\alpha} \quad (12)$$

测得 e, α , 便可求得热传导率 K . 由样品表面温度 h_g 可以得到光声信号为:

$$\delta p(t) = Q_c(0, t) e^{i(\omega t - \frac{\pi}{4})} = \frac{\gamma P_0}{\sqrt{2} l_g a_g T_0} h_g e^{i(\omega t - \frac{\pi}{4})} \quad (13)$$

式中 l_g, a_g, T_0, p_0 分别是气体柱的长度, 热扩散系数以及温度和压力, 将(11)式代入(13)

式就可得到完整的光声信号表达式. 我们对(13)式进行讨论, 并和其它模型进行比较:

(1) 对于单层样品, 即样品层 s_1, s_2 与背衬材料为同一样品, 在(11)式中 $b=s=1$, 则可得到和 RG 理论中公式(9)完全一致的结果.

(2) 对于带表面层的单层样品, 即埋层 s_1, s_2 是同一样品, 也就是 $s=e_2/e_1=1$, 则可得到与文献(10)中式(48)一致的结果.

从以上的比较可以看出: 在特殊情况下, 公式(13)和其它相应的公认的理论计算结果是一致的, 但它具有普遍性, 可适用更多层状的结构. 光声信号具有振幅和相位两方面的信息, 根据式(13), 图 2(a), (b)分别给出了埋层 s_1 不同的热学性质及厚度对光声幅度及相位的频率特性的影响.

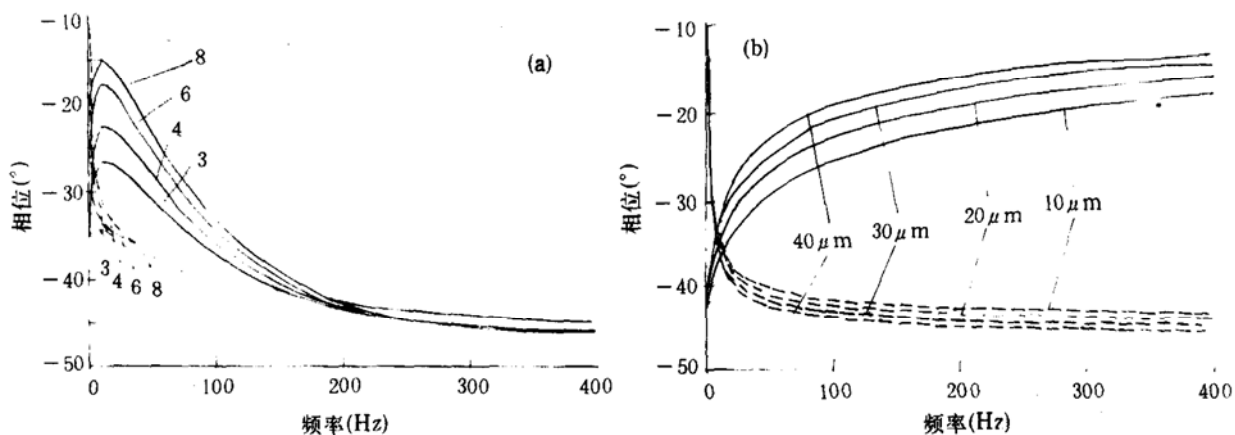


图 2 (a) 不同的埋层热学性质 e_1/e_c 下, 振幅与相位的频率特性曲线. — 为相位曲线, --- 为振幅曲线
(b) 不同的埋层厚度 l_1 下, 振幅与相位的频率特性曲线. — 为相位曲线, --- 为振幅曲线

从图 2(a)中可以看出, 光声信号的振幅与相位随埋层样品 s_1 的热流系数的不同而明显变化, 在低频情况下, 信号变化更大, 随着调制频率的增大, 差异逐步减小, 直至趋于相同, 这是由于调制频率越高, 信号越来自于靠近表面的样品层, 热波的穿透深度越小, 直至埋层样品的热学性质和产生的光声信号趋于无关. 同样从图 2(b)也可以看到这种情况: 频率越高, 埋层厚度对光声信号的影响越小, 所以, 在实验过程中必需选择光声信号对所测参数最敏感的区域, 使热波可以穿透到所测的样品层. 从图 2(a), (b)来看, 光声信号相位随埋层性质变化的程度明显大于同等情况下光声信号振幅的变化程度, 光声相位对埋层样品的热学参数与厚度的变化更敏感, 另外, 光声相位测量和光源入射功率, 光声池几何尺寸等因素无关, 可以克服小功率 He-Ne 激光功率不稳的问题, 所以, 我们采用测量光声相位的方法来检测埋层性质. 将(13)式的复数的虚实部分离, 可得到光声相位的表达式为:

$$\varphi = -\frac{\pi}{4} + \arctg \frac{(R_1 R_2 + I_1 I_2 + m)(\beta^2 R + 2a_c^2 h) - (R_1 I_2 - I_1 R_2 + n)(\beta^2 h - 2a_c^2 k)}{(R_1 R_2 + I_1 I_2 + m)(\beta^2 h - 2a_c^2 k) + (R_1 I_2 - I_1 R_2 + n)(2a_c^2 h + \beta^2 k)}$$

其中 $R_1 = (1 + \frac{1}{s})(1-b)e^{-a_2 l_2 - a_1 l_1} \cos(a_2 l_2 + a_1 l_1) - (1 - \frac{1}{s})(1+b)e^{a_2 l_2 - a_1 l_1} \cos(a_2 l_2 - a_1 l_1)$

$$I_1 = (1 + \frac{1}{s})(1-b)e^{-a_2 l_2 - a_1 l_1} \sin(a_2 l_2 + a_1 l_1) + (1 - \frac{1}{s})(1+b)e^{a_2 l_2 - a_1 l_1} \sin(a_2 l_2 - a_1 l_1)$$

$$R_2 = (1-g)(1 + \frac{1}{c}) \cos a_c l_c e^{-a_c l_c} + (1+g)(1 - \frac{1}{c}) e^{a_c l_c} \cos a_c l_c$$

$$\begin{aligned}
I_2 &= (1+g)(1-\frac{1}{c})e^{a_1 l_c} \sin a_1 l_c - (1-g)(1+\frac{1}{c})e^{-a_1 l_c} \sin a_1 l_c \\
R_3 &= (1-b)(1-\frac{1}{s})e^{-(a_2 l_2 + a_1 l_1)} \cos(a_2 l_2 + a_1 l_1) - (1+b)(1+\frac{1}{s})e^{a_2 l_2 - a_1 l_1} \cos(a_2 l_2 - a_1 l_1) \\
I_3 &= (1-b)(1-\frac{1}{s})e^{-(a_2 l_2 + a_1 l_1)} \sin(a_2 l_2 + a_1 l_1) + (1+b)(1+\frac{1}{s})e^{a_2 l_2 - a_1 l_1} \sin(a_2 l_2 - a_1 l_1) \\
R_4 &= (1-g)(1-\frac{1}{c})\cos a_1 l_c e^{-a_1 l_c} + (1+g)(1+\frac{1}{c})\cos a_1 l_c e^{a_1 l_c} \\
I_4 &= (1+g)(1+\frac{1}{c})e^{a_1 l_c} \sin a_1 l_c - (1-g)(1-\frac{1}{c})\sin a_1 l_c e^{-a_1 l_c} \\
m &= [(R_3 R_4 + I_3 I_4) \cos 2a_1 l_1 - (R_3 I_4 - R_4 I_3) \sin 2a_1 l_1] e^{2a_1 l_1} \\
n &= [(R_3 I_4 - R_4 I_3) \cos 2a_1 l_1 + \sin 2a_1 l_1 (R_3 R_4 + I_3 I_4)] e^{2a_1 l_1} \\
A &= (1-\frac{1}{c})e^{a_1 l_c} [(1-\beta/2a_c) \cos a_1 l_c - \beta/2a_c \sin a_1 l_c] + (1+\frac{1}{c}) \cdot e^{-a_1 l_c} \cdot [(1+\beta/2a_c) \\
&\quad \times \cos a_1 l_c - \beta/2a_c \sin a_1 l_c] - 2(1+\beta/2a_c)e^{\beta l_c} \\
B &= (1-\frac{1}{c})e^{a_1 l_c} [(1-\beta/2a_c) \sin a_1 l_c + \beta/2a_c \cos a_1 l_c] - (1+\frac{1}{c})e^{-a_1 l_c} \cdot [\beta/2a_c \cos a_1 l_c + (1+ \\
&\quad \beta/2a_c) \sin a_1 l_c + 2\beta/2a_c e^{-\beta l_c}] \\
h &= AR_1 + BI_1 + R_3 [(F_r \cos 2a_1 l_1 - F_i \sin 2a_1 l_1) + I_3 (F_i \sin 2a_1 l_1 + F_r \cos 2a_1 l_1)] e^{2a_1 l_1} \\
R &= BR_1 - I_1 A + R_3 [(F_i \sin 2a_1 l_1 + F_r \cos 2a_1 l_1) - I_3 (F_r \cos 2a_1 l_1 - F_i \sin 2a_1 l_1)] e^{2a_1 l_1} \\
F_r &= (1+\frac{1}{c})e^{a_1 l_c} [(1-\beta/2a_c) \cos a_1 l_c - \beta/2a_c \sin a_1 l_c] + (1-\frac{1}{c})e^{-a_1 l_c} [(1+\beta/2a_c) \cos a_1 l_c - \\
&\quad \beta/2a_c \sin a_1 l_c] - 2(1-\beta/2a_c)e^{-\beta l_c} \\
F_i &= (1+\frac{1}{c})e^{a_1 l_c} [(1-\beta/2a_c) \sin a_1 l_c + \beta/2a_c \cos a_1 l_c] - (1-\frac{1}{c})e^{-a_1 l_c} [(1+\beta/2a_c) \cos a_1 l_c - \\
&\quad \beta/2a_c \sin a_1 l_c] - 2(\beta/2a_c)e^{-\beta l_c}
\end{aligned}$$

其中: a_n ($n=1, 2, c, b$) 是各层的热扩散系数, $a_n = \left(\frac{\omega}{2\alpha_n} \right)^{1/2}$.

三、实验系统与方法

实验装置如图 3 所示, 10mw 的 He-Ne 激光作为激励光源, 光束经斩波器 (SR-510, 4Hz—400Hz) 后通过透镜聚焦到光声池上, 光声信号通过前置放大器输入双相精密锁相放大器 (SR-530), 其输出相位精确到 0.01° , 并保证误差小于 1° , 然后由计算机通过 IEEE-488 接口采集信号, 由于调制频率的扫描也是由计算机设定控制的, 所以, 本系统可以实现全自动的实时采集, 对所测样品进行多次测量, 通过多点平均方法来消除电路噪声对信号相位的部分影响, 得到更真实的光声相位信号, 最后根据最佳的频率范围, 选取实验数据, 利用非线性的麦夸脱法进行理论拟合^[11], 得到待测的热学参数或厚度。

要得到真实的光声相位信号, 必须首先决定测量系统的固有相位, 它主要是由电子测量线路的附加相移, 入射光束在斩波器上的不同位置等原因造成的, 并且随着调制频率的改变而不断变化, 对于同一测量系统却是相同的。根据 RG 理论, 不透明的热厚样品 ($l \gg \mu$, μ 是热扩散长度) 的光声相位应恒为 -45° , 通过测量该样品在各频率下的光声信号相位可以推算出测量

系统的固有相位的频率特性曲线,本实验采用的定标样品是厚度为 1mm 的铅块. 在测量样品时,将测得的相位逐点减去测量系统的固有相位,从而得到真正的光声相位-频率谱.

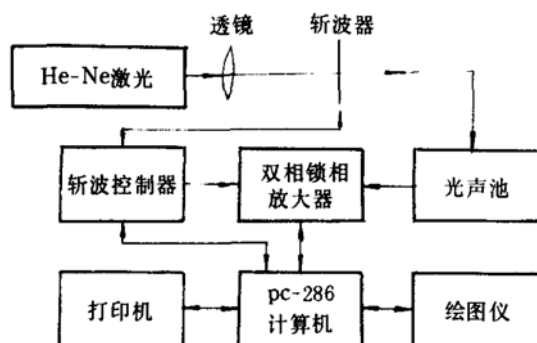


图3 多层样品光声测量的实验装置图

本实验测量的多层金属薄膜是经过真空镀膜制备而成的. 表面层是铅层,厚度约为 $1\mu\text{m}$, 以保证入射光在此层内被完全吸收,在表面层以下是待测的埋层,基底是 0.8mm 的载玻片,各镀层的厚度可以在镀膜过程中利用测厚装置测量,我们分别测量了埋层 1 和埋层 2 的热扩散率和热传导率,并和文献报导值进行了比较,另外,还在黄铜片的正反面分别镀上不同厚度的镍层,并测量这些多层样品各埋层的厚度,并和其它实验结果进行了对比.

四、结果和讨论

在所测的多层样品中,二层埋层材料共有六个参数可供测量,即各层的热扩散率 α ,热传导率 K 和厚度 l ,通过实验测量值的理论拟合很难同时得到这些参数的收敛的真值,一般在其它参数已知的前提下,可以得到其中任意一层的 $2l$ 和 K . 为了检验本方法测量不同埋层的热学性质的能力,分别测量了埋层 1 和埋层 2 性质未知的多层样品. 这些样品各层的厚度都是在镀膜过程中测得的. 表面层 pb 的热学参数为: $\alpha: 0.250(\text{cm}^2\text{s}^{-1})$, $K: 0.085(\text{Cal cm}^{-1}\text{K}^{-1}\text{s}^{-1})$,埋层 Al 的热学参数为: $\alpha: 0.980(\text{cm}^2\text{s}^{-1})$, $K: 0.48(\text{cm}^{-1}\text{Cal K}^{-1}\text{s}^{-1})$,背衬材料玻璃的 α 为 $0.00532(\text{cm}^2\text{s}^{-1})$, $K: 0.00234(\text{Cal cm}^{-1}\text{K}^{-1}\text{s}^{-1})$ ^[12]. 测量埋层 1 和埋层 2 的热学参数的实验数据及拟合曲线分别如图 4 和 5 所示,拟合结果及文献值分别列于表 1.

表 1 样品的热扩散率与热传导率的拟合结果与文献值对照

样 品	厚度(μm)*	热扩散率(cm^2s^{-1})			热传导率($\text{Cal cm}^{-1}\text{K}^{-1}\text{s}^{-1}$)		
		拟合值	文献值 ^[13]	偏 差	拟合值	文献值 ^[13]	偏 差
纯铜(埋层 1)	0.90	1.09	1.12	2.6%	0.896	0.917	2.2%
青铜(埋层 1)	0.83	0.180	0.173	4.3%	0.154	0.149	3.4%
纯镍(埋层 2)	0.76	0.467	0.456	4.2%	0.164	0.157	4.4%
紫铜(埋层 2)	0.81	0.314	0.302	3.9%	0.260	0.249	4.3%

* 厚度的数据是在镀膜过程中用测厚装置测得的.

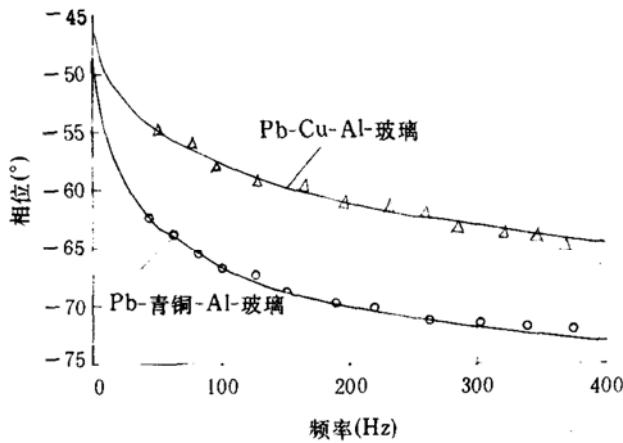


图4 被测样品位于埋层1的光声相位
实验数据及其拟合曲线

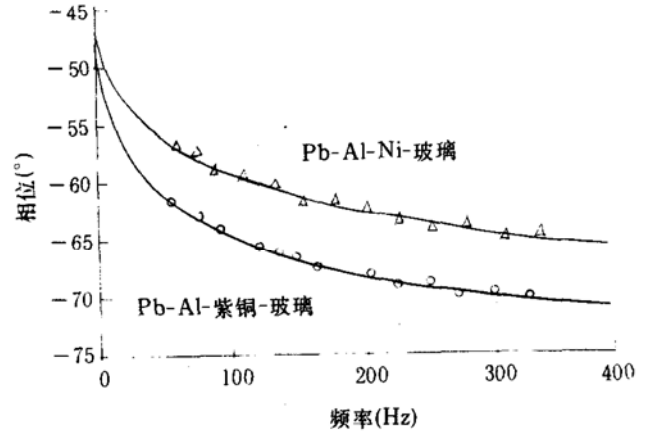


图5 被测样品位于埋层2的光声相位
实验数据及其拟合曲线

从图4和5中可以看出:实验数据能和理论模型很好地符合,表1显示的实验结果也和报导值一致,它们之间的偏差可能是由以下几个原因引起的:(1)涂膜样品的不纯,(2)各层样品之间的扩散现象造成样品性质的改变,(3)锁相放大器的相位输出存在的误差.以上说明只要选择好合适的实验频率范围及计算程序,本方法可以在不大的误差范围内独立地测量各埋层的热扩散率和热传导率,而这些参数在常规的传热学方法必须采用两种不同的测量装置,对样品形状也有一定要求,对多层薄膜样品的热学参数的测量是无能为力的,而本方法可以监测涂成薄膜前后样品热学性质的变化以及薄膜厚度对样品热学性质的影响,这对激光损伤的研究具有重要意义,另外,它还能对界面特性的研究提供有价值的信息.

本方法还可以在各层热学性质已知的前提下,测量多层样品的各埋层厚度.我们测量了多层样品(Ni-Cu-Ni-玻璃)的埋层1及埋层2的厚度.表面层的厚度为 $80\mu\text{m}$,样品Cu和Ni的热学参数见表1.图6是埋层厚度不同的三个多层样品的实验数据及理论拟合曲线,表2是拟合结果与其它方法测量值的比较,后者是在电镀过程中,对各镀层分别用光学显微镜测量的结果.

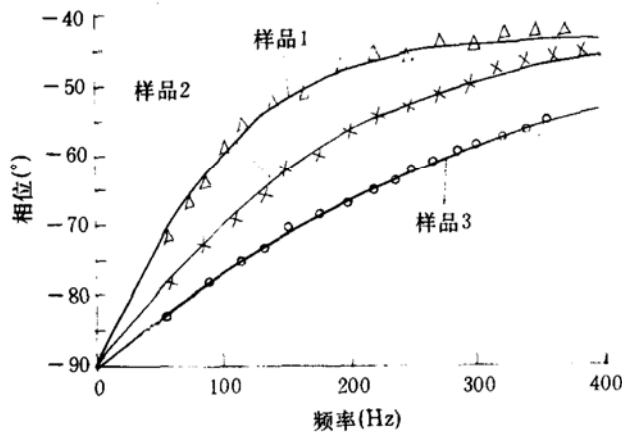


图6 多层样品埋层厚度的测量数据及拟合曲线

表 2 多层样品埋层厚度的拟合结果及其比较值

	样品 1		样品 2		样品 3	
$L_1(\mu\text{m})$ (埋层 1)	50.5	49.7*	80.2	79.3*	100.1	100.9*
$L_2(\mu\text{m})$ (埋层 2)	81.3	80.5*	101.2	100.4*	150.2	149.6*

* 此值是光学方法测量镀层厚度得到的测量值

表 2 显示两种方法符合较好,这说明本方法可以非接触地、无损伤地直接测量埋层介质的厚度,这在薄膜研究中具有一定的应用价值。

从理论和实验上都可以看出:光声方法可以检测埋层的热学性质,由于缺陷的存在而造成的热学性质的变化必然会在光声信号尤其是相位信号中得到体现,光声信号又包含着纵向深度的信息,可以利用本方法确定缺陷的位置和深度。如果入射光被聚焦到足够小,缺陷存在处的纵向可看成适合本模型的多层样品,同时入射光束在表面进行二维扫描,根据光声相位信号的变化确定热学性质突变的位置并确定其深度。另外,采用更大功率的激光光源可以提高调制频率的测量范围,可以探测多层材料界面效应的存在与性质。

五、结 论

从本文的实验结果来看:本文提出的理论模型在实验条件下与实际情况相符合,实验方法是可行的,可以在小功率激励光源的条件下,有效地测量多层样品埋层的热学性质及其厚度,具有非损伤,方法简便,灵敏度高的特点,是亚表面物性检测的十分有效的方法。

参 考 文 献

- [1] A. Rosenwaig, "Photoacoustic and Photoacoustic Spectroscopy" (Wiley, New York, 1980).
- [2] A. Rosenwaig, G. Busse, *Appl. Phys. Lett.* **36**(1980), 27-29.
- [3] R. T. Suimm, *Appl. Phys. Lett.* **42**(1983), 1955-1957.
- [4] Andre Lanchaine, Patrick Ponlet, *Appl. Phys. Lett.* **45** (1984), 953-955.
- [5] M. J. Admas, G. F. Kirkbright, *Analyst* **102** (1977), 281-287.
- [6] Y. Sugitani, M. Fujinami, *Bull. Chem. Soc. Jpn.* **54** (1981) 722-728.
- [7] P. Charpentier, F. Lepontre, *J. Appl. Phys.* **53** (1982), 608-614.
- [8] O. Pessoa, L. Cesar, N. A. Patel, *J. Appl. Phys.* **59** (1986), 1316-1322.
- [9] J. Opsal, A. Roseuwaig, *J. Appl. Phys.* **53**(1982), 4240-4254.
- [10] N. C. Fernelius, *J. Appl. Phys.* **51** (1980), 650-661.
- [11] 冯康等, "数值计算方法", 国防工业出版社, 1981 版, 154.
- [12] 杨世铭主编, "传热学", 高等教育出版社, 1980 版, 438.
- [13] Y. S. Touloukin, "Thermal Properties of Matter" (IFI/Plenum, New York, 1970), 762-779.