

用光声技术测量 ZnO 薄膜的压电系数*

黎 光 殷庆瑞 罗维根 殷之文

(中国科学院上海硅酸盐研究所)

摘 要

本文报导了用光声技术测量溅射 ZnO 薄膜的压电系数,介绍了用来测量 ZnO 薄膜压电系数的理论分析和实验方法。本实验所得压电系数 e_{33} 、 e_{31} 的值分别为 0.817 C/m^2 和 -0.431 C/m^2 ,与 ZnO 单晶的值相比是合理的。

关键词: 光声效应; 压电效应; ZnO; 薄膜

一、引 言

溅射 ZnO 压电薄膜已在许多方面得到了广泛应用,如表面波和体波滤波器、超声换能器、微波声信号探测器等等。但是如何定性地分析它的压电性或者定量地测量它的压电系数则报导甚少。我们发现,用基于 ZnO 薄膜光声效应的光声技术来定量地测量它的压电系数并不很困难^[1]。由于 ZnO 薄膜光声信号的幅度与它的压电系数有关,如果知道了光声信号表达式中其他的参数,便能很容易地计算出压电系数。

二、理 论 分 析

如上所说,用于测量 ZnO 薄膜压电系数的光声法是基于薄膜的光声效应。当一束强度调制的光照在 ZnO 压电薄膜样品上时,部份光能就会被吸收并通过无辐射跃迁转换成热能。周期性的温度变化使样品产生膨胀和收缩,从而通过它的压电效应在电极上产生电信号(即光声信号)。

在详细分析了与 ZnO 薄膜光声效应有关的物理过程之后,我们就可以推导出光声信号的表达式。在通常条件下,可以独立求解热扩散方程来得到由样品吸收光能而产生的温度变化,然后用热扩散方程的解代入波动方程中就可以进一步得到样品中的应力变化。为了求解热扩散方程和波动方程,我们根据实际情况选择了某些合理的边界条件。有关这些方程的一般求解过程可参考文献[2,3],这里只列出几个主要的步骤及最后的理论分析结果。

1. 解有源热扩散过程,求出样品的温度分布函数 $\theta(z, t)$ 。在本研究中,由于光斑直径比材料扩散长度大得多和样品厚度远小于表面尺度,故整个扩散可近似地用一维函数处理。另外,热释电效应的影响在这里可忽略^[4]。

* 1985年9月24日收到初稿;1985年12月18日收到修改稿。

$$K \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} = \rho C_p \frac{\partial \theta}{\partial t} - \frac{1}{2} \beta \eta I_0 e^{\beta z} e^{i\omega t} \quad (Z < 0) \quad (1)$$

式中右边第二项是由光照在样品上所产生的热能的变化成份，用复数表示。 K 为导热系数， ρ 为密度、 C_p 为热容、 β 为光吸收系数、 η 为光热转换率、 $\omega/2\pi$ 为调制频率、 t 为光照时间、 z 为样品厚度方向坐标， I_0 为入射光强度。

2. 把温度分布函数 $\theta(z, t)$ 代入波动方程求出质点位移 $u(z, t)$ 。

$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{1}{C^2} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \alpha \frac{\partial \theta}{\partial z} \quad (2)$$

式(2)中 $C = \sqrt{\frac{1}{\rho s}}$ 为声速(s 为弹性系数)、 α 为热膨胀系数。

3. 把 $u(z, t)$ 代入压力方程，并对样品厚度积分，就可得到光声信号的表达式，其幅度 V 可表示为：

$$\begin{aligned} V &= \left| \int_{-l}^0 E(z, t) dz \right| \\ &= \left| \int_{-l}^0 \frac{e}{\epsilon^*} \cdot \frac{\partial u}{\partial z} dz \right| \\ &= B \left(\frac{e \cdot \alpha}{\epsilon^*} \right) \cdot \frac{l \cdot I_0}{\sqrt{\rho C_p K \omega}} [\exp(\omega^{1/2} \cdot A) + \exp(-\omega^{1/2} \cdot A)]^{-1} \quad (3) \end{aligned}$$

式中： $E(z, t)$ 为样品中电场强度分布函数， $e(e_{33}, e_{31})$ 为待测的压电系数， $\epsilon^s(\epsilon_{11}^s, \epsilon_{31}^s)$ 为介电系数， l 为 ZnO 薄膜厚度， A 是与样品表面碳黑层厚度和热物理性能有关的常数， B 是与光热转换率和热波传播能量损失有关的常数。

三、实验与结果

在石英玻璃基底上溅射一层 ZnO 压电薄膜，并在薄膜样品表面蒸镀 Cr—Au 电极。为了增加光的吸收，在薄膜样品的光照表面涂上碳黑层。最后把试样放在 X—Y 扫描台上。用双相锁相分析仪 (Prin, Appl, Res, Corp, Model 9505) 检测薄膜样品产生的光声信号。

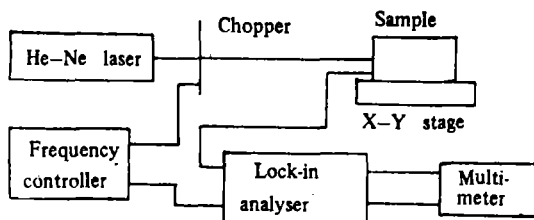


图 1 实验装置示意图

Fig. 1. Schematic diagram of the experimental apparatus

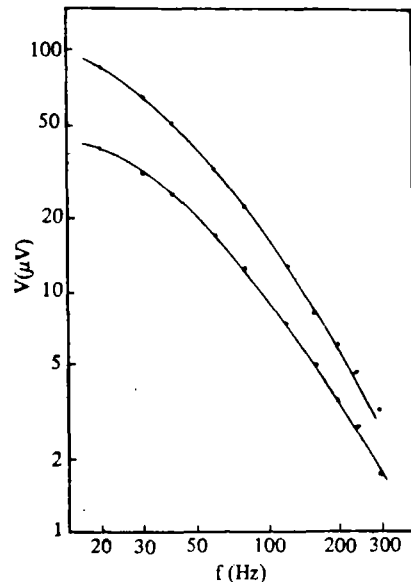


图 2 光声信号幅度与调制频率关系的曲线

Fig. 2. The PA-amplitude as a function of the modulation frequency

—; Fitting curves; Experimental curves

参考信号由调制频率控制器提供(Rofin Ltd, Corp., № 08130)。上海激光研究所生产的He—Ne(70 mW)激光器作为光源。实验装置如图1所示。方程(3)中的光声信号幅度 V 可直接从数字万用表的读数得到。 $\omega_1 I_0$ 可直接测定, l 、 ρ 、 ϵ^* 可由不同方法确定。 C_p 、 K 、 α 的值用ZnO单晶的值来代替。另外,常数 A 可通过计算机拟合光声信号与调制频率的关系曲线精确确定(图2),常数 B 可通过标准样品计算得到(选用的标准样品为 x 切割石英压电晶体)。把以上得到的所有参数代入方程(3)中,就可很容易地计算出ZnO薄膜的压电系数 e_{33} 和 e_{31} 。常数 A 、 B 和计算得到的压电系数 e_{33} 和 e_{31} 以及ZnO单晶相应的压电系数见表1。

表1 ZnO薄膜和晶体的常数 A 、 B 和压电系数
Table 1. Constants A , B and e values of ZnO film and crystal

	A	$B \times 10^{-3}$	$e_{33}(\text{C/m}^2)$	$e_{31}(\text{C/m}^2)$
ZnO thin film	0.145	3.29	0.817	
ZnO thin film	0.169	12.0		-0.431
ZnO crystal			1.14	-0.61

Other parameters are $I_0=0.14\text{W/cm}^2$; $L=11\ \mu\text{m}$ and $\epsilon_{33}=8.33, \epsilon_{31}=8.84$

四、讨 论

本文用于确定ZnO薄膜压电系数的光声法是基于ZnO薄膜的光声效应。它主要与试样的热物理性能和压电性有关。光声信号是由ZnO薄膜的压电性产生的。这种方法不仅能够定性地确定ZnO薄膜的压电性,比较制膜工艺条件、组分、膜厚对压电性能的影响,而且还能定向地测量出ZnO薄膜的压电系数。与ZnO单晶的数值相比较,测量所得到的ZnO薄膜压电系数的值是合理的。它作为一种新的方法用来定性和定量地研究ZnO薄膜的压电性是很有意义的。本文所描述的ZnO薄膜的理论分析和实验方法,同样也适用于其他薄膜材料压电性能的研究。为了更精确地得到ZnO薄膜的压电系数,对薄膜的某些热物性参数需要进行更深入地研究,这些工作正在进之中。

参 考 文 献

- [1] 黎光:“铁电体和有关材料光声效应及其应用的研究”,中国科学院上海硅酸盐研究所硕士学位论文毕业论文,1985
- [2] Carslaw, H. S. and Jaeger, J. C.: «Conduction of Heat in Solids» Oxford, Clarendon Press, 1973
- [3] Nowacki, W.: «Thermoelasticity», Oxford, Pergamon, 1962
- [4] Zook, J. D.: J. Appl. Phys., 49, 1978: 4604

Measurement of Piezoelectric Coefficients of ZnO Thin Film with Photoacoustic Technique

Li Guang, Yin Qingrui, Luo Weigen and Yin Zhiwen
(Shanghai Institute of Ceramics, Academia Sinica)

Abstract

Piezoelectric coefficients e_{33} , e_{31} of sputtered ZnO thin film have been measured by photoacoustic technique. e_{33} and e_{31} values obtained are 0.817 C/m^2 and -0.431 C/m^2 respectively. The theoretical consideration and experimental procedures used to evaluate the piezoelectric coefficients of ZnO thin films have been presented as well.

Keywords: Photoacoustic effect; Piezoelectric effect; ZnO; Thin film