

干涉法测量压电材料的复压电常数

高西汉

陈尧生

(西安电子科技大学技术物理系,
西安 710071)

(中国科学院西安光学精密机械研究所,
西安 710068)

G. Arlt

(德国亚琛工业大学电工材料研究所, 德国亚琛 5100)

摘 要 介绍了采用迈克尔逊干涉仪测量压电材料复压电常数的新方法。干涉仪中一个平面反射镜与被测试样粘为一体, 另一个与控制压电陶瓷粘为一体。利用光电二极管和两相锁相放大器对干涉图像进行转换和放大测量。被测试样长度形变的检测分辨率可达 0.6 μm 。文章给出了对 PZT 系列 PXE5 型压电陶瓷 d'_{31} 、 d''_{31} 与温度、频率关系的测量结果, 温度范围为 $-60\sim 90^\circ\text{C}$, 频率范围为 2.5 Hz~2.5 kHz。

关键词 光干涉, 压电材料, 压电常数。

1 引 言

压电材料是一种应用广泛的功能材料, 对其压电常数测量技术的研究以及获得精确可靠的方法和仪器, 对探索材料压电机理, 开发新型材料, 改进和充分利用现有材料都是十分重要的。

最早, 也是用得最多的测量方法是静态法和准静态法^[1], 测出的仅是压电常数的绝对值。研究表明^[2], 压电常数与介电、弹性常数一样都是复数量, 而且也有随频率变化的色散现象。因此, 测量材料复压电常数及其随频率变化的工作就显得很重要。近年来 Smith^[3] 研究成功测量压电振子阻抗迭代法, 但这是一种间接法。Hamono^[4] 采用光干涉法, 虽然可以直接测量复压电常数, 测量频率的上限也大大提高, 但由于实验中用改变干涉仪气压达到改变光程差的方法, 在测量结果的稳定性和可靠性方面不能令人满意。同时, 被测试样形变的分辨率仅达 33 μm 。本文对上述方法进行改进, 用压电陶瓷的形变改变光程差, 既方便可靠, 还可使被测试样形变的分辨率达 0.6 μm 。利用这一方法测量飞利浦公司 PZT 系列 PXE5 型压电陶瓷的 d'_{31} 、 d''_{31} 。

2 测量原理及方法

测量原理如图 1 所示。建立一个迈克尔逊干涉仪。光源采用 He-Ne 激光束, 经分束器 S,

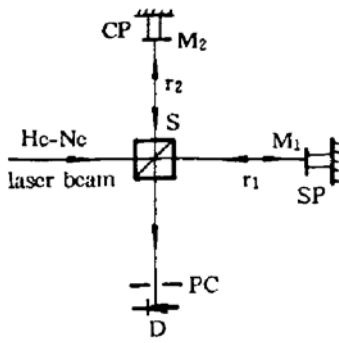


Fig. 1 Schematic to measure piezoelectric constants with interferometric method

一束由与试样 SP 粘为一体的平面反射镜 M_1 反射后再经 S 射向光电二极管 D。另一束由与控制压电陶瓷 CP 粘为一体的平面反射镜 M_2 反射后再经 S 也射向 D。在 D 处二光束产生干涉，由 D 转换为电信号输出放大和测量。PC 为光阑。

设 I_1, I_2, r_1, r_2 分别为两束光的光强和光程，在 D 处光强

$$I = I_1 + I_2 + 2 \sqrt{I_1 I_2} \cos \frac{2\pi(r_2 - r_1)}{\lambda} \geq 0 \quad (1)$$

如果计及光束在 M_1, M_2 与 S 之间的二次反射及光束的不平行度，上式可写为^[4]

$$I = \frac{I_m + I_n}{2} + \frac{I_m - I_n}{2} \cos \frac{2\pi(r_2 - r_1)}{\lambda} + J \cos \left[\frac{4\pi(r_2 - r_1)}{\lambda} - \phi \right] \quad (2)$$

I_m, I_n, J 是 I_1, I_2 的函数，如果 M_1 垂直 M_2 ，则角度 $\phi = 0$ 。光束在 M_1, M_2 与 S 之间的高次反射由于强度很小可以不予考虑。

当试样受到电压作用时，因逆压电效应试样将沿 r_1 方向产生形变， M_1 的位置及光程 r_1 随之发生变化，从而导致光程差和干涉图像的变化。试样应变 S_i 与电场 E_j 间遵守关系式 $S_i = d_{ji} E_j$ 。 d_{ji} 为压电应变常数。设 $E_j = E_0 \cos \omega t$ ，则试样沿 r_1 方向的形变量

$$\Delta l_i = \Delta l'_i - j \Delta l''_i = d_{ji} l_i E_0 \cos \omega t \quad (3)$$

式中 $\Delta l'_i = d'_{ji} l_i E_0 \cos \omega t$ ，为试样形变实部， $\Delta l''_i = d''_{ji} l_i E_0 \cos \omega t$ ，为试样形变虚部， $d_{ji} = d'_{ji} - j d''_{ji}$ ，为复压电应变常数， d'_{ji}, d''_{ji} 分别为实、虚部。若 $|\Delta l_i| \ll \lambda$ ，则

$$I = I_{DC} + I_{AC} \quad (4)$$

式中 $I_{DC} \geq 0$ 为直流分量，由(1)或(2)式给出， I_{AC} 为交变分量。

$$I_{AC} = -I_0 \cos \omega t = -(I'_0 - j I''_0) \cos \omega t \quad (5a)$$

$$\text{式中 } I_0 = \frac{2\pi(I_m - I_n)d_{ji}l_i E_0}{\lambda} \sin \frac{2\pi(r_2 - r_1)}{\lambda} + \frac{8\pi J d_{ji}l_i E_0}{\lambda} \sin \left[\frac{4\pi(r_2 - r_1)}{\lambda} - \phi \right] \quad (5b)$$

在控制压电陶瓷 CP 上施以 0~25 V 线性上升、周期为 3 min 的锯齿波电压，使其沿 r_2 方向产生几个波长的形变，则 M_2 的位置及光程 r_2 也将随之变化并导致干涉图像的变化，由 D 转换为电信号经二相锁相放大器放大，从而实现对 I_{DC}, I'_0, I''_0 最大、最小值的测量。

图 2 为飞利浦公司 PZT 系列 PXE5 型压电陶瓷在 1 kHz 时，x-y 记录仪上给出的 I_{DC}, I'_0, I''_0 随时间(即 M_2 位移)变化曲线。由图可见， I_{DC} 按余弦函数变化， $I(\max) = 125 \text{ mV}$ ， $I(\min) = 7 \text{ mV}$ ，而 I'_0, I''_0 按正弦函数变化并反相。曲线是对称的，其间的相移几乎为零，因此可以忽略高次反射以及因光束不平行带来的影响，故

$$d'_{ij} = \frac{\lambda [I'_0(\max) - I'_0(\min)]}{4\pi [I(\min) - I(\max)] l_i E_0} \quad (6a)$$

$$d''_{ij} = \frac{\lambda [I''_0(\max) - I''_0(\min)]}{4\pi [I(\max) - I(\min)] l_i E_0} \quad (6b)$$

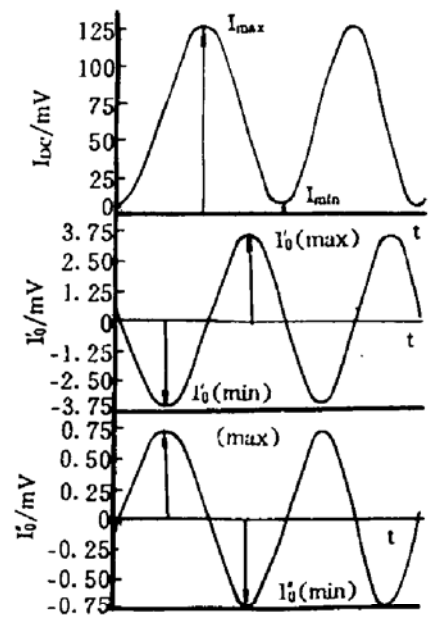


Fig. 2 A x-y recorder chart of I_{DC}, I'_0, I''_0 with time ($f = 1 \text{ kHz}$)

式中 $I(\max)$ 、 $I(\min)$ 分别为光强直流分量的最大值和最小值， $I_0(\max)$ 、 $I_0(\min)$ 分别为光强交流分量实部的最大值和最小值， $I'_0(\max)$ 、 $I'_0(\min)$ 分别为光强交流分量虚部的最大值和最小值。

测量中采用 He-Ne 激光源， $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ 。试样上有电极，按电极的不同设置可测材料的 d_{31} 、 d_{33} 等。外施电场的频率为 $2.5 \text{ Hz} \sim 2.5 \text{ kHz}$ 。

整个干涉仪放入杜瓦瓶中。由电阻丝通电供热、液氮降温。实验由低温向高温进行，温度的变化范围为 $-60 \sim 90^\circ\text{C}$ 。温度的测量和控制由 PT100 铂金属丝和计算机完成。当温度升高时，升温速度控制在 $1^\circ\text{C}/\text{min}$ ，到达预定温度后保温 2 h，使其充分达到热平衡。测量期间温度的变化保持在 0.05°C 之内。测量装置具有防震措施。测量和记录全部由计算机按编制程序完成。

3 测量结果和讨论

图 3 为 PXE5 压电陶瓷 d'_{31} 、 d''_{31} 与温度 T 的关系。图 4 为 d'_{31} 、 d''_{31} 与频率的关系。

1) 对比度：由图 2 可见， $I(\max) = 125 \text{ mV}$ ， $I(\min) = 7 \text{ mV}$ ，对比度 $= \frac{I(\max) - I(\min)}{I(\max)} = 94.4\%$ ，可见 I_1 、 I_2 差别不大。

2) 测量形变分辨率：激光源噪音为 10^{-2} ，锁相放大器灵敏度 10^{-3} ， $|\Delta I_{AC}| \geq 10^{-5} I_{DC}$ ，

$$\text{又 } |\Delta I_{AC}| = \frac{2\pi[I(\max) - I(\min)]}{\lambda} |\Delta l_i|$$

$$\therefore |\Delta l_i| \geq 10^{-5} \frac{\lambda[I(\max) + I(\min)]}{4\pi[I(\max) - I(\min)]} = 0.6 \text{ pm}.$$

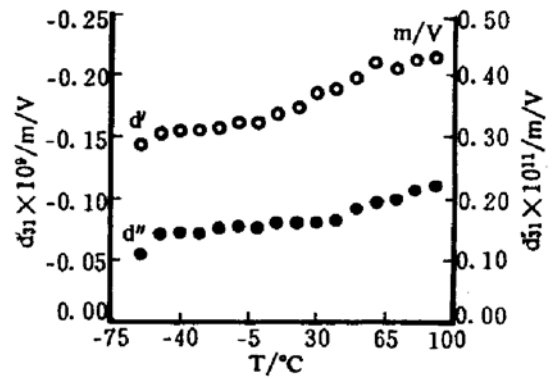


Fig. 3 Temperature dependence of d'_{31} 、 d''_{31} ，measured on PXE5 piezoelectric ceramic ($f = 160 \text{ Hz}$)

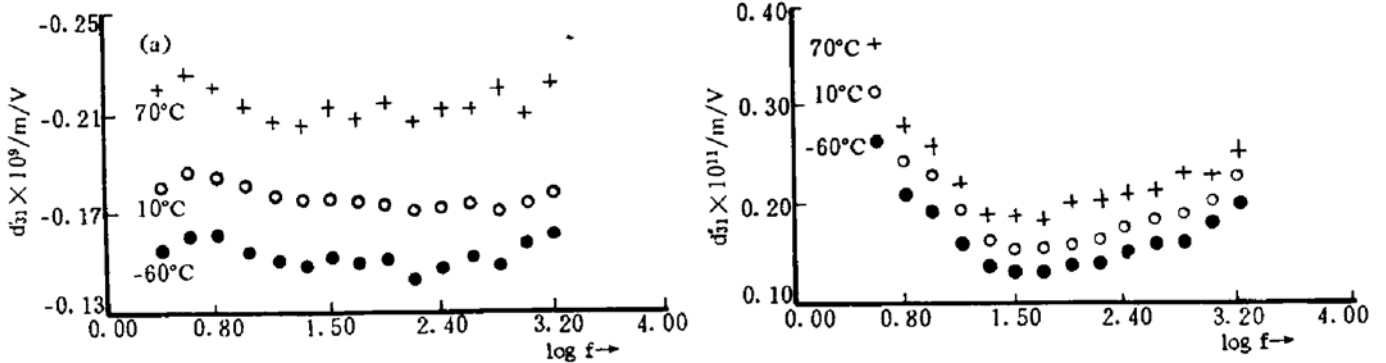


Fig. 4 Frequency dependence of d'_{31} (a)， d''_{31} (b)，measured on PXE5 piezoelectric ceramic

3) 测量频率上、下限：本实验所用试样本身谐振频率约 13 kHz ，与反射镜 M_1 及粘接附件组成的系统其谐振频率约为 5.3 kHz ，因此测量频率上限为 5 kHz 。考虑到测量环境的震动以及锁相放大器的抗干扰能力，下限约为 2.5 Hz 。

4) 测量误差：试样尺寸的测量只能在室温下进行，其误差为 $\pm 1\%$ ；锁相放大器实部和虚部的测量误差分别为 $\pm 0.5\%$ 和 $\pm 3\%$ ；激光源光强稳定度 $\pm 1\%$ ；外部机械震动和温度的波动。因此在整个频率和温度范围内 $\Delta d'_{ij} = \pm 2.7\%$ ， $\Delta d''_{ij} = \pm 5.2\%$ 。由飞利浦公司公布的 PXE5 型材料 $d_{31} = -1.78 \times 10^{-10} \text{ m/V}^{[5]}$ ，与本实验结果相近，实验的重复性也较好。

本实验装置还可测量材料其它的压电常数及弹性常数。

感谢德国亚琛工业大学电工材料研究所在实验中提供的各种方便。

参 考 文 献

- [1] IRE Standards on piezoelectric crystals; Measurements of piezoelectric ceramics, 1961, *Proc. IRE*, 1961, **49** : 1161~1169
- [2] G. Arlt, Piezoelectric relaxation. *Ferroelectrics*, 1982, **40** : 149~157
- [3] Jan G. Smith, Iterative method for accurate determination of the real and imaginary parts of the materials coefficients of piezoelectric ceramics. *IEEE Trans. Sonics & Ultrasonics*, 1976, **Su-23**(6) : 393~401
- [4] Toshihisa Yamaguchi, Katsumi Hamano, Interferometric method of measuring complex piezoelectric constants of crystals in a frequency range up to about 50 kHz. *Japan. J. Appl. Phys.*, 1979, **18**(5) : 927~932
- [5] N. V. Philips' Gloeilampenfabrieken. Piezoelectric ceramics, EINDHOVEN-The Netherlands. 1968, June

Interferometric Method of Measuring Complex Piezoelectric Constants of Piezoelectric Materials

Gao Xihan

(Department of Applied Physics, Xi'dian University, Xi'an 710071)

Chen Yaosheng

(Xiam Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Xi'an 710068)

G. Arlt

(Institute für Werkstoffe der Elektrotechnik,

Aachen Technical University, Germany, Aachen 5100)

(Received 20 July 1994; revised 13 November 1994)

Abstract In this paper, a new method of measuring complex piezoelectric constants of piezoelectric materials with Michelson interferometer is presented. The interferometer consists of two mirrors, one is attached to the sample and the other to the controlled piezoelectric ceramic, By using photodiode and two phase lock-in amplifier, the interference figure is transferred, amplified and measured. A change of sample length due to converse piezoelectric effect as small as 0.6 pm is detected. In the range of frequency of 2.5 Hz~2.5 kHz and temperature of $-60\sim 90^{\circ}\text{C}$, the d'_{31} , d''_{31} of PXE5 piezoelectric ceramic of PZT series are measured and discussed.

Key words interference, piezoelectric material, piezoelectric constant.