

# 逆压电效应的压电常数和压电陶瓷微位移驱动器\*

陈大任 李国荣 殷庆瑞  
(中国科学院上海硅酸盐研究所 上海 200050)

## 摘 要

本文介绍了由逆压电效应的应变-电场曲线测得弱场和强场下的压电常数  $d_{33}$ 、 $d_{31}$ 。测量发现  $S \sim E$  曲线上呈现应变和压电系数突增的阈值场强  $E_b$ ，用铁电陶瓷固有的  $90^\circ$  畴转向对应变的贡献进行了分析和讨论。该方法与以往常用的正压电效应的压电常数测试相比，方便、简单，尤其对逆压电效应的压电微位移驱动器应用更具有实际意义。

关键词 压电常数，逆压电效应，压电陶瓷微位移器

## 1 引言

压电陶瓷微位移驱动器 (Actuator) 是目前压电陶瓷应用的一个极重要分支，它具有体积小、分辨率高、响应速度快、不发热、低能耗、无电磁干扰等优点，在微米-纳米驱动和控制技术中占有越来越重要的地位，引起了国内外高度重视。它们的应用涉及到精密光学、微型机械、激光通讯、生物遗传工程、超大规模集成电路芯片制备等重要高新技术领域。

压电陶瓷微位移驱动器的基本工作原理是利用压电陶瓷的逆压电效应：施加电场的瞬间，材料产生可控的应变。应变遵循基本的逆压电方程：

$$S_j = d_{ij} E_i \quad (1)$$

式中  $S$  为应变， $E$  为电场强度， $i$  和  $j$  分别为电场和应变方向。

关于压电微位移器应变的基本模式和它们的主要性能参数示于表 1。

表 1 压电陶瓷微位移器应变的基本模式和基本参数  
Table 1 The basic strain modes for piezoelectric ceramic actuator and their main parameter

Strain mode of actuators		Piezoelectric constant	Strain or displacement
Stretch-extending	Longitudinal	$d_{33}$	$S_3 = d_{33} E_3$ $\Delta L_3 = d_{33} V_3$
	Transverse	$d_{31}$	$S_1 = d_{31} E_3$ $\Delta L_1 = d_{31} V_3 L_1 / L_3$
Bending		$d_{31}$	$Y = 3(L/T)^2 d_{31} V_3^{(1)}$

$L$ : Length of piezo-wafer,  $T$ : Width of piezo-wafer

所谓纵向伸缩模的微位移器，即电场和产生应变的方向一致，均为 3 方向，利用压电应变常数  $d_{33}$ ；而对于横向伸缩模电场方向为 3，利用的应变方向为 1，电场和应变方向下互垂

\* 1997年6月2日收到初稿，7月2日收到修改稿

上海市科学技术发展基金 (95JC14016)，国家 863 计划 (715-006-0060)，上海市青年科技启明星计划 (96QE14030) 资助

直, 决定性能的压电应变常数为  $d_{31}$ . 由于  $d_{33}$  和  $d_{31}$  是压电微位移器性能的基础, 所以正确测量和分析  $d_{33}$  和  $d_{31}$ , 这对器件的性能设计和制造有着极为重要的意义.

对于压电陶瓷, 尚有施加机械应力转变为电荷或电位移的正压电效应, (利用该效应的功能器件有点火、加速度计、流量计等), 它们满足的压电方程为

$$D_j = d_{ij}T_i \quad (2)$$

$D$  为电荷密度,  $T$  为应力. 原理上 (1) 式的  $d_{ij}$  (逆压电效应—m/V) 和 (2) 式的  $d_{ij}$  (正压电效应—C/N) 在数值上是相等的, 以往压电常数  $d_{33}$  是通过正压电效应的静态法、准静态法或动态法 (共振—反共振法) 测量或计算得到<sup>[2,3]</sup>; 对  $d_{31}$  常数的获得更为复杂: 在共振—反共振的动态法基础上, 结合测量材料的泊松比、弹性柔性常数、密度等参数间接计算而得<sup>[3]</sup>, 不仅十分繁复, 而且势必引入了较大的误差. (详见 3.2)

本文试图制得一些简易的纵、横向伸缩模压电陶瓷微位移试样和器件, 直接用逆压电效应法测得  $d_{33}$ 、 $d_{31}$  参数 (即测量它们  $S \sim E$  曲线的斜率). 用该方法测得的压电常数, 直接用于逆压电效应的压电微位移器具有更实际的应用意义. 由逆压电效应测得的  $d_{33}$ 、 $d_{31}$  常数与通常由正压电效应获得的值进行了比较, 联系压电材料  $90^\circ$  电畴转向等基本特性, 对  $S \sim E$  曲线和压电常数的影响进行分析讨论, 不仅对压电常数的分析和测量, 尤其对压电微位移器的设计、制备和性能分析有较大的帮助.

## 2 实验

### 2.1 压电陶瓷材料的制备和性能

本工作选铌铯、锆、钛酸铅三元压电陶瓷为对象, 组成式为  $x\text{Pb}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3-y\text{PbZrO}_3-z\text{PbZrO}_3$   $x=0.30\sim 0.35$ ,  $y$ 、 $z=0.30\sim 0.36$ . 采用传统的压电陶瓷工艺制备了  $\phi 17 \times 1\text{mm}$  试样, 在纯  $\text{Al}_2\text{O}_3$  坩埚中密闭烧成, 烧结温度为  $1260\sim 1300^\circ\text{C}/\text{h}$ , 致密烧结的试样经磨片、被银电极后进行强场极化, 极化条件为  $3500\text{V}/\text{mm}$ 、 $130\sim 140^\circ\text{C}$ 、 $15\text{min}$ . 所制得的压电陶瓷的主要性能列于表 2.

表 2 本工作采用和制备的压电陶瓷的主要性能

Table 2 The main properties of piezoelectric ceramic utilized and prepared in this work

Apparent density $\rho/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	Dielectric constant $/\epsilon$	Dielectric loss $\tan\delta/\%$	Piezoelectric constant $d_{33}/10^{-12}\text{m}\cdot\text{V}^{-1}$	Piezoelectric constant $d_{31}/10^{-12}\text{m}\cdot\text{V}^{-1}$	Curie temperature $T_c/^\circ\text{C}$
77	$\sim 3600$	$\sim 2.0$	530*	$\sim 270^+$	167

\* Measured from quasi-static method for direct piezoelectric effect

+ Calculated from resonant-antiresonant frequencies in dynamic method

### 2.2 试样、器件的制备和 $S \sim E$ 特性的测量

制备了尺寸为  $2 \times 3 \times 12\text{mm}$  长条形试样用于测量  $S_3 \sim E_3$  和  $S_1 \sim E_3$  特性曲线, 并通过计算其斜率, 得到压电参数  $d_{33}$  和  $d_{31}$ . 长条的  $2\text{mm}$  方向的上下表面被有银电极, 为施加电场  $E_3$  和应变  $S_3$  的方向,  $12\text{mm}$  方向为测量应变  $S_1$  方向. 位移测量采用了 DGS-6 型数显电感测微仪 (中原量仪厂生产), 分辨率为  $0.01\mu\text{m}$ .  $S_3 \sim E_3$ 、 $S_1 \sim E_3$  的曲线和斜率  $d_{33}$ 、 $d_{31}$  值表示于图 1. 同时尚用正压电效应的准静态法和动态法测得的  $d_{33}$  和  $d_{31}$  值一并列于表 3. 以作对比.

本工作制备了简单的  $d_{31}$  伸缩模压电微位移器件, 尺寸为  $0.5 \times 1 \times 10\text{mm}$ , 和圆片堆式  $d_{33}$  模压电微位移器, 尺寸为  $\phi 17 \times 1$ , 6 片组成 (各片的电场并联, 位移量相叠加), 它们的  $S \sim E$  曲线和  $d_{33}$ 、 $d_{31}$  参数示于图 1 和表 3.

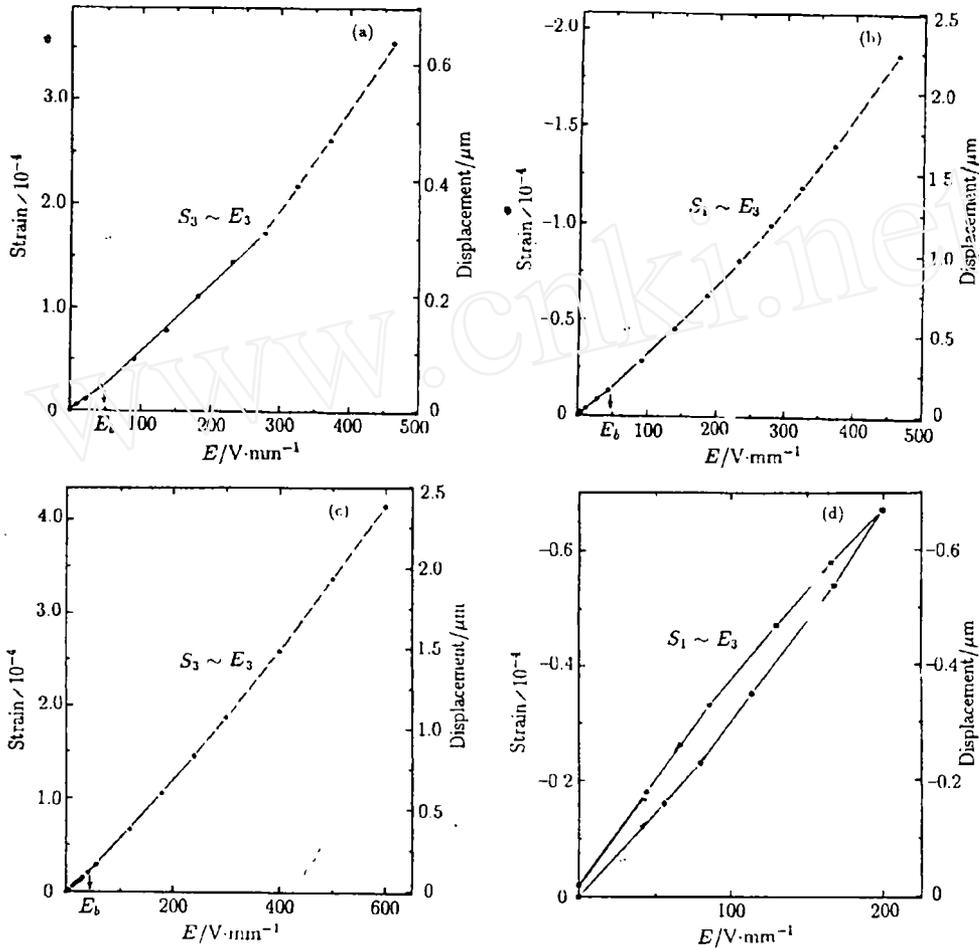


图 1 压电材料及驱动器的电压与应变关系

Fig.1 The electric field dependence of strain for piezoelectric material and its actuator

(a) Standard sample:  $2 \times 3 \times 12 \text{mm}$ ,  $S_3 - E_3$ ; (b) Standard sample:  $2 \times 3 \times 12 \text{mm}$ ,  $S_1 - E_3$ ; (c) Actuator:  $\phi 17 \times 1 \text{mm}$ ,  $S_3 - E_3$ ; (six piezoelectric-layers) (d) Actuator:  $0.5 \times 1 \times 10 \text{mm}$ ,  $S_1 - E_3$

表 3 由应变与电场关系曲线获得的压电常数  $d_{31}$ 、 $d_{33}$

Table 3. The piezoelectric constants  $d_{31}$ ,  $d_{33}$  measured from the relation curves of strain  $S$  vs electric field  $E$

Direct piezoelectric effect (dynamic method)		$d_{31}$		$d_{33}$		
		Converse piezoelectric effect		Direct piezoelectric effect (quasi-static method)	Converse piezoelectric effect	
		$E$ (weak field) $\sim 60 \text{V/mm}$	$E$ (relative high field) $\sim 300 \text{V/mm}$		$E$ (weak field) $\sim 60 \text{V/mm}$	$E$ (relative high field) $\sim 300 \text{V/mm}$
Long bar sample	-270	-285(1±0.03)	-380(1±0.004)	530	513(1±0.12)	665(1±0.02)
Simple devices	—	-290	-390	—	515(1±0.03)	675(1±0.005)

Note: The errors of  $d_{31}$ ,  $d_{33}$  measured by the converse effect are estimated from the measured displacement

### 3 结果和讨论

#### 3.1 应变在 $E_b$ 处呈现突增, 与 $90^\circ$ 畴的不可逆转向

图 1 表明了以下特点: 各  $S \sim E$  曲线在弱场区均呈现良好的线性关系; 在某一电场  $E_b$  时 (称为阈电场), 应变  $S$  出现显著增加的转折; 在电场  $\sim 300\text{V/mm}$  以上, 随  $E$  上升,  $S$  增加更为显著.

测量  $S \sim E$  曲线获得了弱场下的压电常数和较强场下的压电系数 (由于此时  $d$  值开始成为  $E$  的函数, 故称其为压电系数更好). 前者是研究压电材料关心的基本参数; 后者则是对于逆压电效应的具体微位移驱动器所关心的重要参数.

对于铁电体而言, 压电效应与电致伸缩效应耦合地存在着<sup>[4]</sup>, 总应变可表示为:

$$\begin{aligned} S &= Q(P_i + P_s)^2 = Q(\epsilon E)^2 + 2Q\epsilon EP_s + QP_s^2 \\ &= ME^2 + dE + QP_s^2 \end{aligned} \quad (3)$$

其中  $Q$ 、 $M$  分别为与极化强度和电场有关的电致伸缩系数;  $\epsilon$  为弱场下介电常数;  $P_i$ 、 $P_s$  为感应和自发极化强度, 并且  $P_i = \epsilon E$ . 对于极化后的压电陶瓷, 在电场下的总应变  $S$  为电致伸缩效应  $ME^2$  贡献和压电效应  $dE$  贡献之和. 由于对一般压电体, 电致伸缩效应贡献  $ME^2$  项十分小, 故可勿略不计. 从 (3) 和 (1) 式可得:

$$d = 2Q\epsilon P_s \quad (4)$$

从 (4) 式可知, 实际上只有当材料是单晶单畴状态时, 在弱电场时  $d$  值才是常数 — 即所谓材料的本征压电效应的  $d_1$ . 对于压电陶瓷, 由于存在着大量地电畴结构, 在电场作用下电畴的运动 (在极化后主要是  $90^\circ$  畴的转向) 将使  $\epsilon$ 、 $P_s$  增加,  $d$  值不再是常数, 而是随  $E$  变化的函数. 所以在较高电场下, 压电陶瓷的  $d_c$  (陶瓷) 由本征压电效应的  $d_1$  和与畴转向贡献所致的  $d_0$  两部分构成:

$$\begin{aligned} d_{c(\text{陶瓷})} &= d_{1(\text{本征})} + d_{0(\text{电畴})} \\ S_{c(\text{陶瓷})} &= S_{1(\text{本征})} + S_{0(\text{电畴})} \end{aligned} \quad (5)$$

从铁电体的晶体结构和自发极化关系出发, 也易于理解压电陶瓷中 (极化后) 存在着  $90^\circ$  畴在电场下转向对应变所产生的贡献:

$$S_0 = \Sigma \frac{c-a}{c} n \quad (6)$$

式中  $c$ 、 $a$  分别为钙钛矿原胞的晶轴长度;  $n$  为作  $90^\circ$  畴壁转向的原胞数. 根据上述分析, 我们从图 1 的  $S \sim E$  曲线可得到以下结果:

(1) 弱场下  $S \sim E$  线性部分的  $d$  值, 主要是  $P_s$  随电场变化产生晶格线性弹性应变的贡献 — 本征压电常数, 以及一小部分随电场  $E$  可作可逆转向的  $90^\circ$  畴的贡献之和<sup>[5]</sup>. 此时, 无论  $E$  上升或下降,  $n$  均正比于  $E$  ( $E \uparrow \rightarrow n \uparrow, E \downarrow \rightarrow n \downarrow$ ), 所以  $S \sim E$  间无滞后现象.

(2) 在较强的电场下 ( $E > E_b$ ), 除了上述两项贡献的应变外, 不可逆的  $90^\circ$  畴转向对应变逐渐占了主要的地位, 造成了应变  $S_c$  和压电系数  $d_c$  的迅速增加, 而且出现了压电陶瓷有畴体所固有的、本质的应变滞后现象. 所谓不可逆  $90^\circ$  畴的贡献, 即当电场下降时, 有一部分  $90^\circ$  畴不能回复, 而保持  $E$  增加时同一电平下的状态,  $E \uparrow \rightarrow n \uparrow \uparrow, E \downarrow \rightarrow n \downarrow, \therefore n(E \downarrow) < n(E \uparrow)$ .

从上述分析可见,  $E_b$  的阈值电场即为压电陶瓷中, 开始突然产生大量不可逆转向  $90^\circ$  电畴的电场强度, 这也是  $E_b$  处  $S_c$  和  $d_c$  值产生迅速增加的突变的原因.

本工作研制和测试的 PZN-PT-PZ 系材料属软性压电陶瓷, 由  $S \sim E$  曲线所得的  $E_b$  值为  $\sim 50\text{V/mm}$ ; 这与 [6] 中 PMN-0.35PT 软性压电陶瓷的  $60\text{V/mm}$  基本一致, 而资料 [5] 报道软性压电陶瓷  $E_b$  值仅为  $20\text{V/mm}$ . 这充分表明压电陶瓷中,  $90^\circ$  畴转向的易难程度受到陶瓷组成、工艺、显微结构(致密度、晶粒、晶界等情况)、极化条件等等综合因素的影响, 存在一定差异是可以理解的.

### 3.2 逆压电效应法测量压电常数的优点

由本工作用逆压电效应测得的压电常数  $d_{33}$  和  $d_3$  值与正压电效应测量获得的  $d_{33}$  和  $d_{31}$  值相比, 基本相同和接近.

经分析, 我们认为用逆压电效应测量上述压电参数, 具有的优点是:

(1) 测量方便、简单, 只要测量位移和施加电压保证一定精度, 压电参数测量便可达到较高的精度, 尤其对于  $d_{31}$  系数的测量, 以往用动态法, 通过以下一些等式计算而得 [3]

$$d_{31} = k_p \sqrt{\left(\frac{1-\sigma}{2}\right) \epsilon_{33}^T S_{31}^E}$$

$$S_{11} = \frac{B^2}{\pi^2 \phi^2 f_i (1-\sigma^2) \rho} \quad (7)$$

式中  $K_p$  为径向机电耦合系数;  $\sigma$  为泊松比;  $\epsilon$  为介电常数;  $S_{11}$  为弹性柔顺系数;  $\phi$  为直径;  $f_s$  为共振频率;  $\rho$  为体积密度;  $B$  为与  $\sigma$  有关的系数, 由于  $d_{31}$  的获得涉及到以上众多参数的测量和计算, 势必带进了较多误差, 不如逆压电效应法直接和简便.

(2) 该方法既可测得弱场下的压电常数, 既有助于对压电材料的基本特性研究; 又可得较强和强场下的“压电系数”; 这对利用逆压效应的压电微位移驱动器的设计、制造和实际应用有着较大意义, 因为该类器件都是在强场下工作的.

### 3.3 材料 $S \sim E$ 特性测量和压电微位移器的制备的设计

众所周知, 硬性压电陶瓷的  $S \sim E$  的滞后量远小于软性压电陶瓷. 在电场强度  $1000\text{V/mm}$  下, 前者可小至  $2\% \sim 3\%$  [7], 而后者一般为  $10\% \sim 20\%$ , 这是由于前者的  $E_b$  高 [5,6], 在强场下不易产生不可逆的  $90^\circ$  电畴, 或包含的不可逆  $90^\circ$  电畴的数量少. 因此对于制备滞后量小、要求控位精度高的压电微位移器(尤其是开路下使用), 必须选用  $E_b$  高的硬性材料.

对于同一压电陶瓷材料来说, 实际工作充分证明: 使用的最高电场越高, 它的  $S \sim E$  的滞后量也就越大, 这也是由于随着电场强度的提高, 材料中产生了不可逆  $90^\circ$  电畴的数量随之迅速增多的缘故, 导致了  $S \sim E$  的滞后量的明显增加. 由此可见, 为获得滞后小的压电微位移器, 提高其控位精度, 不论软性、硬性压电陶瓷材料, 在应用时均希望尽量地降低其最高工作电场. 器件采用多层独石结构 [7]: 降低试片的厚度, 增加并联试片的数量是一重要的途径.

### 3.4 利用 $d_{31}$ 压电参数的横向伸缩模压电微位移器的特点

目前, 常用的压电陶瓷微位移器大部分是纵向伸缩模利用  $d_{33}$  的器件形式, 而不是横向伸缩模, 这主要是由于  $d_{31}$  压电常数比  $d_{33}$  小得多, (一般是  $d_{33}$  的  $1/2 \sim 1/3$ ), 所以横向应变也小. 然而我们认为, 对于某些一维方向不受尺寸限制的应用, 则可以利用增加器件长度的途径, 以达到较大的绝对位移量的目的, 器件二维方向的尺寸可以很小. 这类器件的制

造也较简便,具有一定特点,发展这类器件可以满足某些应用的需要.

#### 4 结论

1. 通过压电陶瓷逆压电效应电场、应变关系的测量,从电场应变的特性曲线可获得弱场下的压电常数  $d_{33}$ 、 $d_{31}$  和强场下的压电系数  $d_{33}$ 、 $d_{31}$ ,前者是压电陶瓷材料研究的基本参数,与以往用正压电效应测得的数值基本一致;后者是对压电陶瓷微位移驱动器应用有实际意义的性能参数.

2. 本工作获得的弱场下电场应变曲线线性良好,并在  $\sim 50\text{V}/\text{mm}$  处呈现了应变和压电系数产生突然增加的现象.这是由于压电陶瓷内突然出现了较多数量的不可逆转向  $90^\circ$  畴对应变贡献所致.

#### 参 考 文 献

- 1 小林正明. *Nat. Tech. Rech. Rept.*, 1982, 28 (1): 39.
- 2 叶正方, 徐正堂. 压电与声光. 1993, 15 (4): 37.
- 3 张沛霖. 电子材料与元件, 1984, 压电陶瓷材料性能测试方法专辑: 4.
- 4 钟维烈. 铁电物理学. 北京: 科学出版社, 1996.
- 5 Zhang Q M, Pan W Y, Jang S J, et al. *J. Appl. Phys.*, 1988, 64: 6645.
- 6 Noblace O, Gaucher P. *Ferroelectrics* 1994, 160: 145.
- 7 陈大任, 李国荣, 张望重等. 功能材料与器件学报, 1997, 3 (4).

### Piezoelectric Constants Measured from Converse Piezoelectric Effect and Piezoelectric Ceramic Actuators

CHEN Daren LI Guorong YIN Qingrui

(Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences Shanghai 200050 China)

#### Abstract

The piezoelectric constants  $d_{33}$  and  $d_{31}$  under weak and stronger field were measured from strain  $S$  vs electric field  $E$  curves for the converse piezoelectric effect. It was shown that on the curves there is a critical field  $E_0$ , from which strains and  $d_{33}$ ,  $d_{31}$  were obviously increased, and the result was discussed in the view of reorientation of  $90^\circ$  domain intrinsically existed in piezoelectric ceramics. This method of measuring  $d_{33}$ ,  $d_{31}$  is simple and convenient, as well as more practical, especially for piezoelectric ceramic actuator, as compared with that usually obtained them from positive piezoelectric effect.

**Key words** piezoelectric constant, converse piezoelectric effect, piezoelectric ceramics actuator