

电致伸缩效应及其应用

王虹

(中山大学物理系)

一、电致伸缩效应

电致伸缩 (electrostriction) 效应是一种机电耦合效应。它是指当外电场作用于电介质上时, 所产生的应变正比于电场强度 (或极化强度) 的平方的现象。由于电致伸缩效应引起的应变与外加电场的方向无关, 所以一般固体电介质都能产生电致伸缩效应。

由热力学唯象理论可知, 对于晶格点群属于具有对称中心的材料, 其应变 x 与极化强度 P 的关系为(无外应力时)

$$x_{ij} = Q_{ijkl} P_k P_l, \quad (1)$$

即应变与极化强度的平方成正比。将 x 的两个脚标按惯例简化成一个, (1)式改写成

$$x_i = Q_{ikl} P_k P_l \quad (i = 1, 2 \dots 6; k, l = 1, 2, 3). \quad (2)$$

再规定

$$Q_{ikl} = \begin{cases} Q_{ik} & (k = l), \\ \frac{1}{2} Q_{i\mu} & (k \neq l), \end{cases} \quad (3)$$

其中 $\mu = 4, 5, 6$, 分别对应于 k, l 的组合为 23, 13, 12。这样, 电致伸缩系数 Q 由本来是 81 个分量的四阶张量, 简化成只有 36 个分量。

以电场作为变量时, 同样有

$$x_i = M_{ikl} E_k E_l, \quad (4)$$

M 也叫电致伸缩系数。

对于立方钙钛矿型结构和其它立方晶系, 电致伸缩系数张量为

$$Q_{ij} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{12} & 0 & 0 & 0 \\ Q_{12} & Q_{11} & Q_{12} & 0 & 0 & 0 \\ Q_{12} & Q_{12} & Q_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Q_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Q_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Q_{44} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

当外加电场沿 1 方向时, $E_2 = E_3 = 0$, $P_2 = P_3 = 0$,

$$x_1 = Q_{11} P_1^2 = Q_{11} \epsilon_{11}^2 E_1^2 = M_{11} E_1^2, \quad (6)$$

$$x_2 = Q_{12} P_1^2 = Q_{12} \epsilon_{11}^2 E_1^2 = M_{12} E_1^2. \quad (7)$$

电致伸缩系数为

$$2Q_{11} = \frac{\partial^2 x_1}{\partial P_1^2}, \quad 2Q_{12} = \frac{\partial^2 x_2}{\partial P_1^2}. \quad (8)$$

利用热力学中麦氏关系, 可得

$$Q_{11} = -\frac{1}{2} \frac{\partial \beta_1}{\partial x_1}, \quad Q_{12} = -\frac{1}{2} \frac{\partial \beta_1}{\partial x_2}, \quad (9)$$

其中 β_1 为介质极化率的倒数, X_1, X_2 为应力分量。

对顺电晶体施加流体静压力 p , 有

$$\frac{\partial \beta_1}{\partial p} = -\frac{\partial \beta_1}{\partial x_1} - \frac{\partial \beta_1}{\partial x_2} - \frac{\partial \beta_1}{\partial x_3} = -2Q_h, \quad (10)$$

式中 Q_h 叫流体静压力电致伸缩系数, 它与 Q_{11}, Q_{12} 的关系为

$$Q_h = Q_{11} + 2Q_{12}. \quad (11)$$

对于电致伸缩效应机理的研究还为时不久。目前研究较多的材料是钙钛矿结构的单晶和陶瓷。在总结实验结果的基础上, 可以认为钙钛矿型结构的单晶或陶瓷的电致伸缩效应符合以下几条经验性规律^[1]:

1. 电致伸缩系数 Q 的大小与材料的铁电、反铁电、顺电态无关, 而取决于材料阳离子排列的有序程度。

2. 电致伸缩系数 Q 与居里-外斯常数 C 的乘积为常数。

3. 电致伸缩系数 Q 正比于热膨胀系数 α 的平方。

表 1 列出了几种材料的流体静压力电致伸缩系数 Q_h , 居里-外斯常数 C 及其乘积值。

为了解释电致伸缩系数与居里-外斯常数

表 1 各种钙钛矿型晶体的电致伸缩系数、居里-外斯常数及其乘积

极性类型	有序类	材 料	Q_h ($\times 10^{-2} \text{m}^2 \text{C}^{-2}$)	C ($\times 10^3 \text{K}$)	$Q_h C$ ($\times 10^3 \text{m}^2 \text{C}^{-2} \text{K}$)
铁 电	无 序	$\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$	0.60	4.7	2.8
		$\text{Pb}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$	0.66	4.7	3.1
	部分有序	$\text{Pb}(\text{Sc}_{1/2}\text{Nb}_{1/2})\text{O}_3$	0.83	3.5	2.9
	简 单	BaTiO_3	2.0	1.5	3.0
		PbTiO_3	2.2	1.7	3.7
		SrTiO_3	4.7	0.77	3.6
		KTaO_3	5.2	0.5	2.6
反 铁 电	部分有序	$\text{Pb}(\text{Fe}_{2/3}\text{U}_{1/3})\text{O}_3$	—	2.3	—
	简 单	PbZrO_3	2.0	1.6	3.2
	有 序	$\text{Pb}(\text{Co}_{1/2}\text{W}_{1/2})\text{O}_3$	—	1.2	—
		$\text{Pb}(\text{Mg}_{1/2}\text{W}_{1/2})\text{O}_3$	6.2	0.42	2.6
非 极 性	无 序	$(\text{K}_{3/4}\text{Bi}_{1/4})(\text{Zn}_{1/6}\text{Nb}_{5/6})\text{O}_3$	0.55—1.15	—	—
	简 单	BaZrO_3	2.3	—	—

的乘积近似不变的实验现象, L. E. Cross, K. Uchino 等人提出了一个简单的模型, 如图 1 所

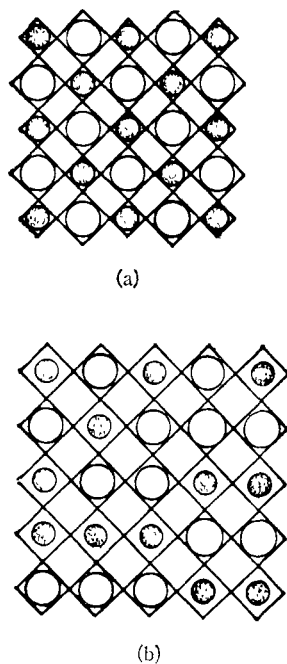


图 1 $A(\text{B}_{II/2}\text{B}_{III/2})\text{O}_3$ 钙钛矿结构
(a) 有序; (b) 无序

示。(a), (b)分别表示 $A(\text{B}_{II/2}\text{B}_{III/2})\text{O}_3$ 型钙钛矿晶体的有序与无序结构, 假定离子是刚性的。

对于无序型结构, 由于半径较大的 B_I 离子撑住了晶格框架, 使得半径小的 B_{II} 离子有较大的活动空间。在有序结构中, B_{II} 离子的周围被 B_I 离子对称地包围着, 因而其活动空间相对无序型结构来说要小。当对无序材料施加电场时, B 离子移动较易, 而不致使氧八面体畸变, 这样单位电场强度引起的极化强度就大, 也就是说介电常数大, 或有较大的居里-外斯常数。但单位电场强度引起的应变却小, 即电致伸缩系数小。另一方面, 在有序结构中, B 离子移动没那么自由, 结果是其居里-外斯常数较小, 而电致伸缩系数较大。可见在两种结构中, 两个参数的乘积总是近似不变的。

根据(6), (7)两式, 电致伸缩应变正比于 Qe^2 。消除与温度有关的部分后, 就是应变正比于 QC^2 。对钙钛矿材料, QC 值近似不变, 因而要得到大的电致伸缩效应, 就要求材料的 Q 值小, C 值大。已经证实, 在扩散相变 (Diffuse Phase Transition) 的材料中, 铁电陶瓷在铁电-顺电相转变时可以得到无滞后的较大的电致伸缩效应, 并已获得有实用价值的结果^[2-11]。对反铁电-铁电相变材料, 类似的情形已在扩散型 PMN-PMW 系统中得到证实^[12,13], 但对非扩散的 PSZT 系统, 仍然存在着滞后现象^[14]。

电致伸缩效应的主要缺点是温度效应大。虽然由实验得到的电致伸缩系数 Q 几乎与温度无关,但介电常数 ϵ 却与温度有密切关系,因而应变也与温度有关。扩散相变材料在相变点附近, ϵ 随温度变化平缓,在温度效应方面可以得到改进。

二、电致伸缩材料

前面已指出,电致伸缩效应在一切固体电介质中都有,但其大小不同。因为应变正比于介电常数的平方,所以铁电体在其相变温度附近应该有较大的应变。从应用上看,要求加一个不太强的电场,能够产生足够大的应变,而且应变与电场的关系没有滞后,重复性好,同时还要求温度效应小。为此,应该选择介电常数大并属于扩散相变的材料。此外还要求平均居里温度在室温以下,接近室温,扩散区较长。目前,大部分铁电体及一些非铁电体如石英、碱卤晶体等材料的电致伸缩系数都已经测量到了。已经发现电致伸缩效应显著的材料有:

1. 铌镁酸铅-钛酸铅固溶体 (PMN-PT)

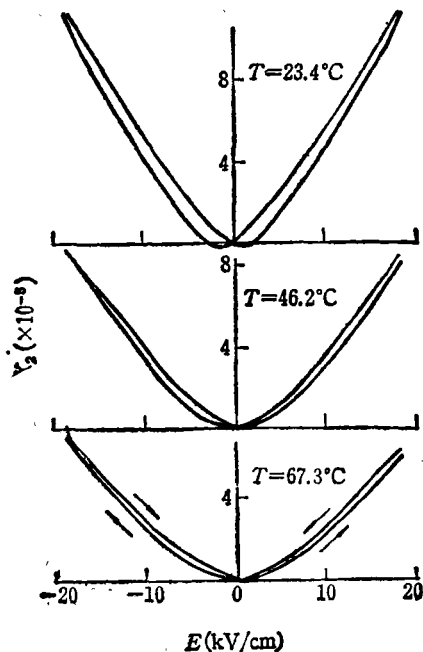


图2 PMN-PT 横向应变

具体的配方为 $0.9 \text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3-0.1 \text{PbTiO}_3$ ^[9]。室温介电常数约为 7000, 扩散区温度为 $0-40^\circ\text{C}$ 。图 2 是它的横向应变与电场的关系,并与 PZT-8 压电效应相比较。可见在周期电场下,应变的大小与重复性都比 PZT-8 好。电致伸缩系数 $Q_{12} = -0.9 \times 10^{-2} \text{m}^4 \text{C}^{-2}$, 热膨胀系数在 $-100-100^\circ\text{C}$ 范围内小于 $1 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 。

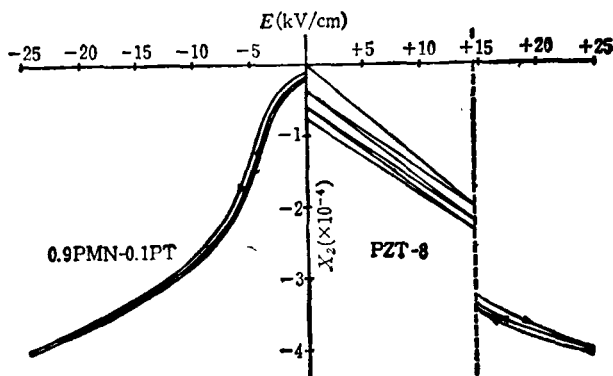


图3 PMN-PT-BZN 横向应变

2. 铌镁酸铅-钛酸铅-铌钽酸钡固溶体 (PMN-PT-BZN)

具体配方为 $0.45 \text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3-0.36 \text{PbTiO}_3-0.19 \text{Ba}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ ^[9]。其介电常数与温度的关系为双扩散型。在两个扩散区之间, ϵ 变化比较平缓。热膨胀很小。应变与电场的关系如图 3 所示。这种双扩散型材料将会用于电致伸缩控位器、应变片等方面。

3. 掺钡的锆钛酸铅 (Ba:PZT)

配方 $(\text{Pb}_{0.73}\text{Ba}_{0.27})_{0.97}\text{Bi}_{0.02}(\text{Zr}_{0.70}\text{Ti}_{0.30})\text{O}_3$ ^[12], 电致伸缩系数很大。 $Q_{11} = 0.60 \text{m}^4 \text{C}^{-2}$, $Q_{12} = -0.27 \text{m}^4 \text{C}^{-2}$ 。在换能器应用方面可能会有潜力。

4. 掺镧的锆钛酸铅 (La:PZT)

居里温度在 55°C 附近。室温介电常数约 6000 左右。电致伸缩系数

$$M_{11} = 6.0 \times 10^{-16} \text{m}^2 \text{V}^{-2}$$

三、应用

随着科学技术的发展,在天文学和光通讯

等方面,需要用精密的位移换能器,以便在几个波长的微小范围内对光程长度进行调节;在精密机械上也需要超微米的给进装置。这一切推动了新型电致伸缩材料系列的发展和应用。

与压电换能器相比,用作电致伸缩器件的扩散型铁电体具有以下优点:(1)具有与压电陶瓷相当的电致伸缩应变;(2)位移重复性好;(3)不需要极化;(4)使用在顺电区,没有畴结构,不存在经时性能改变的问题;(5)热膨胀系数十分小。

制造电容器的工业中所采用的多层技术,在新型电致伸缩器件的发展中起着重要的作用。在位移换能器中用多层片叠合起来,使其在电场的作用下产生的位移是相加关系。在压电器件中,给定电压下的位移正比于层数。而对于电致伸缩器件来说,整个位移却正比于层数的平方,这也是电致伸缩器件优于压电器件的特征之一。用 PMN-PT 陶瓷制成的内电极多层微位移计,在 200V 的电压下,厚度 25mm 的瓷片可产生 25 μ m 的位移,即 $x \sim 10^{-3}$,而且在周期电场下重复性十分好^[1]。

将经过热压烧结的 PMN 切成 18mm²、0.3 mm 厚的片子,抛光后在 1000 $^{\circ}$ C 退火 4 小时,均匀溅射上银电极后,用环氧树脂将一块 20 mm 见方、0.13mm 厚的玻璃粘上,就制成了一个耦连式变形镜^[6],可以用来使相干光束自适应地再聚焦。与 PZT 变形镜相比,PMN 器件没有滞后的影响,表现了作镜面调节的优越性。

用 PMN 电致伸缩传感器还能制成双稳态光学器件,用于法布里-珀罗谐振器。其特点是非线性反馈、快速响应及无滞后行为^[17]。利用这种有 PMN 电致伸缩致动器的双稳态光学器件制成光稳定器,输出功率重现性好,在宽的输入功率范围内几乎不变。

电致伸缩的逆效应即介电常数随压力(或应变)的变化,提供了一种测量压力的方法。PMN-PT-BZN 材料由于在室温附近具有稳定

的温度特性,可以用来制成新型应力计,检验单轴压力及流体静压力。

电致伸缩是非线性机电转换的效应。当所加电场为交变电场时,频率为 ω 的信号能产生频率为 2ω 的机械振动。如果加上两个频率分别为 ω_1, ω_2 的电场,材料可产生频率 $2\omega_1, 2\omega_2, \omega_1 + \omega_2, \omega_1 - \omega_2$ 的混频声振动。将 La: PZT 瓷片与一片铁电 PZT-5 圆片粘接起来构成一个双晶片,采用弯曲振动模就可以制成适应于低频率(1000kHz 以下)的电-声、电-声-电倍频器,混频器。

总之,由于电致伸缩器件的发展,促进了电致伸缩材料的实验和理论研究工作,可以预期,电致伸缩在未来的电子技术和光学通讯等方面将起越来越重要的作用。

参 考 文 献

- [1] S. Nomura, K. Uchino, *Ferroelectrics*, **41**(1982), 117.
- [2] S. J. Jang et al., *Ferroelectrics*, **27** (1980), 31.
- [3] L. E. Cross et al., *Ferroelectrics*, **23**(1980), 187.
- [4] S. Nomura et al., *Phys. Status Solidi (a)*, **57** (1980), 317.
- [5] S. J. Jang et al., *J. Amer. Ceram. Soc.*, **64**(1981), 209.
- [6] W. A. Schulze et al., *J. Amer. Ceram. Soc.*, **63** (1980), 596.
- [7] K. Uchino et al., *J. Mater. Sci.*, **15**(1980), 2643.
- [8] J. Kuwata et al., *Japan. J. Appl. Phys.*, **19** (1980), 2099.
- [9] K. Uchino et al., *J. Appl. Phys.*, **51**(1980), 1142.
- [10] K. M. Leung et al., *Ferroelectrics*, **27** (1980), 41.
- [11] K. Uchino et al., *J. Mater. Sci.*, **16**(1981), 569.
- [12] K. Uchino et al., *Japan. J. Appl. Phys.*, **19** (1980), 1425.
- [13] K. Uchino et al., *J. Appl. Phys.*, **52**(1981), 1455.
- [14] 许煜寰, 中山大学学报(自然科学版), **1**(1983), 19.
- [15] K. M. Leung, S. T. Liu, *Ferroelectrics*, **27** (1980), 41.
- [16] T. Sato H. Ishida, O. Ikeda, *Appl. Optics*, **19** (1980), 1430.
- [17] M. Comi et al., *Jpn. J. Appl. Phys.*, **20**(1981), 2375.