

功率型压电陶瓷的分类及研究进展

廖擎玮 陈小随 郭 栋[†]

(中国科学院声学研究所 北京 100190)

摘要 功率型压电材料是大功率换能器及压电变压器等的核心功能材料,广泛应用于声纳系统、超声检测、振动控制及其它机电设备等。尽管其组成和制备方法与其他压电材料类似,但特定的使用目的对功率型压电材料提出了特殊的综合性能要求。本文基于对功率型压电陶瓷材料组成的分类归纳,综述了该材料的性能特点、国内外研究进展,并对现存问题和应用前景进行了论述。

关键词 压电陶瓷, 准同型相界, 铁电性, 换能器

中图分类号: TM282

文献标识码: B

文章编号: 1000-310X(2013)06-0509-06

Current status of research on various high-power piezoelectric ceramics

LIAO Qingwei CHEN Xiaosui GUO Dong

(Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract High power piezoelectric materials are critical components for piezoelectric transducers and transformers and are widely used in sonar system, ultrasonic testing, vibration control and other electromechanical systems. Although their composition and processing are similar to those of normal piezoelectric materials, the application environments set special requirements on their overall performance. Based on a composition classification, this article reviews the performance and research advances of high power piezoelectric ceramics, and discusses their current issues from both scientific and application points of view.

Key words Piezoelectric ceramics, Morphotropic phase boundary, Ferroelectricity, Transducer

1 引言

功率型压电材料是大功率发射型换能器、压电变压器等的核心功能材料,广泛用于声纳系统,超声检测、振动控制和其他机电转换系统等。在这些应用中,功率型压电模块需在大的电功率下产生大

的弹性应变从而发挥其压电效应,进而进行机电能量的转换。持续的大振幅振动导致大内摩擦和介质损耗并产生大量热,易引起应力破坏、疲劳破坏及性能恶化,这就要求相应的压电材料在保证一定压电性能的基础上,具有相对较高的机械品质因数 Q_m 和尽可能低的介电损耗,且具有良好的机械稳定

2013-02-25 收稿; 2013-03-21 定稿

作者简介: 廖擎玮 (1986-), 女, 贵州遵义人, 助理研究员, 研究方向: 压电铁电材料及声学换能器。

陈小随 (1983-), 女, 博士后, 博士。

郭栋 (1974-), 男, 研究员, 博士。

[†] 通讯作者: 郭栋, E-mail: dong.guo@mail.ioa.ac.cn

性和交变环境温度或长期使用过程中的抗老化性能^[1]。这些性能指标的综合要求使得功率型压电材料的制备较为困难。功率型压电材料主要包括压电陶瓷、压电单晶和压电复合材料。与其他压电材料相比，压电陶瓷具有综合电学性能优异、价格便宜、易于批量生产及性能可调控等优点，是应用最广的功率型压电材料。本文按照组成对功率型压电陶瓷进行归纳分类，对其性能特点、研究进展及存在问题和应用前景进行了综述，并简单介绍了相关功率型压电单晶和复合材料的应用现状。

2 功率型压电陶瓷的分类及研究现状

与其他压电陶瓷材料的传统分类方法类似，功率型压电陶瓷按组分可分为二元系、三元系和四元系等。而传统的功率型压电陶瓷主要是含铅系氧化物陶瓷，其性能特点和研究状况分述如下。

2.1 二元系大功率压电陶瓷

锆钛酸铅 $\text{Pb}(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$ (PZT) 是最典型最常用的二元系钙钛矿 (Perovskite) 结构压电陶瓷。其晶格结构如图 1 所示。其铁电四方相的边长 $a=b<c$ 。B 位的 Zr、Ti 离子在 c 轴方向的位移使得该晶胞正负电荷中心不重合，从而出现自发极化产生压电效应。而常用 PZT 的组成主要是在 Zr/Ti 比为 52/48 的准同型相界 (Morphotropic Phase Boundary, MPB) 附近^[2]。MPB 在上世纪 50 年代即被发现，但 PZT 相图到本世纪初还一直在改进。PZT 的改进相图如图 2 所示^[3]， P_c 为非铁电立方相， F_T 为铁电四方相， F_R 为铁电菱方相， F_M 为新发现的单斜相， A_T 为反铁电四方相， A_O 为反铁电正交相。这里着重提出该 MPB 相界有两点原因：首先，尽管有结构不稳定、四方相与菱方相之间的单斜过渡相 (图 2 中的 F_M)、

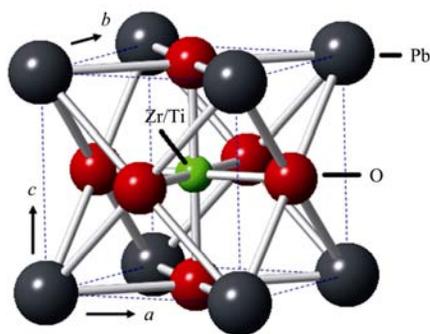


图 1 锆钛酸铅 $\text{Pb}(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$ 晶格结构

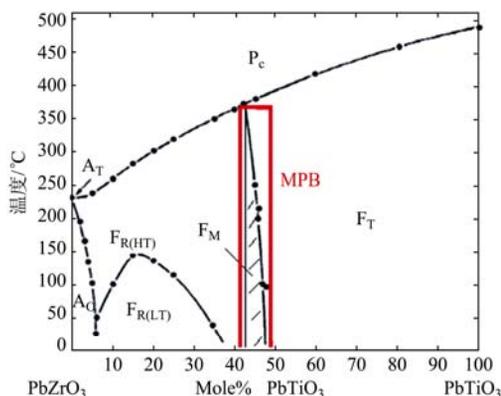


图 2 含单斜过渡相的改进 PZT 低温相图

极化旋转及钛酸铅的特殊结构等理论解释^[3-6]，MPB 处最优值出现的原因至今仍未完全了解；另外，各种组分不同的陶瓷材料也广泛存在性能最优 MPB，其分析确定也成为重要的各类压电陶瓷设计和制备原则。

压电陶瓷材料的特点之一是通过改变化学组成和添加掺杂剂对其电性能进行大范围调整。PZT 的两类掺杂中，“硬性”掺杂是指添加 Fe^{3+} 、 Mn^{2+} 、 Co^{2+} 等替代 B 位 Zr/Ti 的低价阳离子，使材料中为保持电平衡出现氧空位，畴壁运动阻力增大，自发极化降低 (压电性相对较差)， Q_m 提高，介电损耗减小。这类掺杂可用于功率型 PZT 压电陶瓷。相应的主要是 Q_m 在 500-600、介电损耗约 0.5%、 d_{33} 大于 320 (所谓 PZT-4 型)，和 Q_m 在 1000-1200、介电损耗约为 0.4%、 d_{33} 大于 220 (所谓 PZT-8 型) 两种型号陶瓷。“软性”掺杂效果与“硬性”效果相反，因此仅通过掺杂改性有时很难得到满足特定性能需求的陶瓷。

2.2 三元系大功率压电陶瓷

为了满足不同需要，在 PZT 二元系的基础上发展了组成更复杂的压电陶瓷。三元系压电陶瓷的研究兴起于 20 世纪 60 年代。常见功率型三元系压电陶瓷主要是铌镁锆钛酸铅、铌锌锆钛酸铅、铌锰锆钛酸铅和铌镉锆钛酸铅等。因铌镁酸铅、铌锌酸铅、铌锰酸铅等均为弛豫型铁电体 (Relaxor)，第三组元的引入通常可降低烧结温度，并使体系存在一定的弛豫铁电特征。几类弛豫铁电材料与 PbTiO_3 也形成准同型相界，如图 3 的三元系压电陶瓷典型相图所示，该体系除 PbZrO_3 与 PbTiO_3 形成的 MPB I 外，弛豫铁电材料 $\text{P}(\text{B}_1,\text{B}_2)\text{O}_3$ 与 PbTiO_3 可形成第二类准

同型相界 MPB II^[7]。两类 MPB 的存在使其性能可在更宽范围内进行调节。如加入低熔点组分,可调节降低烧结温度,控制 PbO 挥发,从而获得气孔率小、均匀致密的陶瓷。典型功率型三元系压电陶瓷的性能分述如下。

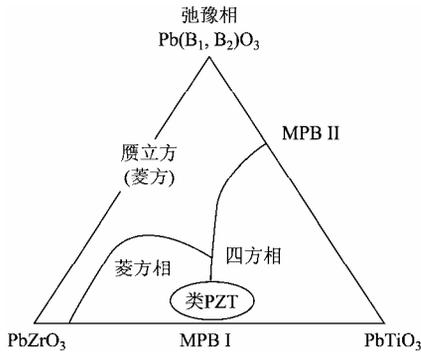


图3 三元系压电陶瓷的相图

2.2.1 铋锰锆钛酸铅系

其主要成分为 $x\text{Pb}(\text{Mn}_{1/3}\text{Sb}_{2/3})\text{O}_3-y\text{PbTiO}_3-z\text{PbZrO}_3$ (PMS-PZT), 随 Zr/Ti 比增加, 体系的相结构从四方相到三方相转化, 在 Zr/Ti=50/50 时, 体系出现三方四方准同型相界。1968 年, 铋锰锆钛酸铅性能的报道引起了国内外研究者的广泛关注。通过稀土元素(Yb^{3+} 、 Eu^{3+} 、 Ce^{4+})对 $0.1\text{Pb}(\text{Mn}_{1/3}\text{Sb}_{2/3})\text{O}_3-0.9\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ 体系进行掺杂, 可使体系兼具“软性”和“硬性”掺杂特征, 使得机械品质因数和压电性能都有一定程度提高^[8]。通常材料 Q_m 增高会引起 d_{33} 下降。然而, CeO_2 掺杂的 PMS-PZT 所报道的 Q_m 为 2800, 且 d_{33} 达到 600 以上^[9]。针对该三元系陶瓷制备工艺、微观结构及电学改性等方面也有还有诸多研究报道。

2.2.2 铋锰锆钛酸铅系

其主要成分为 $x\text{Pb}(\text{Mn}_{1/3}\text{Nb}_{1/3})\text{O}_3-y\text{PbTiO}_3-z\text{PbZrO}_3$ (PMnN-PZT)。随着 $\text{Pb}(\text{Mn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ 含量的增加, 该体系四方度 (c/a) 减小, 介电常数、压电常数、机械品质因数及机电耦合系数先增大后减小, 而介电损耗逐渐增大; 随着 Zr/Ti 比增加, 相结构由四方相向三方相转变, 居里温度降低。铋锰锆钛酸铅 Q_m 值达 3700^[10], 但压电常数较低 (100 左右)。因此, 该体系单独应用的不多, 通常进一步制成更复杂的四元系应用。2006 年 Kim Y M 等人^[11]用 Al_2O_3 对其改性后, 报道体系的 d_{33} 大于 400, 且 Q_m 大于 1700, 使 PMnN-PZT 成为优良的功率型

压电材料。

2.2.3 铋镁锆钛酸铅系

主要成分为 $x\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{1/3})\text{O}_3-y\text{PbTiO}_3-z\text{PbZrO}_3$ (PMN-PZT), 随着 PbZrO_3 含量的增加, PMN-PZT 陶瓷的介电常数和压电常数减小, 机电耦合系数增大。 $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ 是一种典型的弛豫铁电体 (Relaxor), 组成无序使其微观结构上表现出长程、中程与短程等不同层次的特征结构, 其间的相互作用使该材料具有不同于普通铁电体的性能, 如弥散型铁电相变, 频率色散, 介电常数温度图谱不显示尖峰, 温度稳定性较好, 电致伸缩性大等。在 PMN-PZT 的准同型相界组成为 $0.2\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3-0.8\text{Pb}(\text{Zr}_{0.475}\text{Ti}_{0.525})\text{O}_3$, 此组分 d_{33} 大于 400。但由于所报道 Q_m 很低 (小于 100), 纯铋镁锆钛酸铅仍需进行掺杂改性才能适用于大功率器件。添加过渡金属元素, 如 Cu、Cr、Ti、Mn 等, 不仅可以与其他组分金属氧化物形成低共熔物, 降低烧结温度, 还可使该材料老化率显著降低, 并提高 Q_m 。2009 年 Tipakontitikul R 等^[12]人报道, 在主成分为 $0.5\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3-0.5\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ 的铋镁锆钛酸铅中添加约 8mol % MnO_2 可制备出 Q_m 大于 1700, 介电损耗约 1% 的材料, 但 d_{33} 却大大降低。

2.2.4 铋锌锆钛酸铅系

主要成分为 $x\text{Pb}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3-y\text{PbTiO}_3-z\text{PbZrO}_3$ (PZN-PZT), 随着 $\text{Pb}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ 含量的增加, 烧结温度降低, PZN-PZT 陶瓷的准同型相界向富钛方移动; 随着 Zr/Ti 比的增加, 烧结温度升高, PZN-PZT 陶瓷晶体结构向三方相转变。 $\text{Pb}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ 也是一种典型的弛豫铁电体, 但纯 PZN 陶瓷很难制备。将 PZN 与 PZT 复合, 在改善体系烧结特性的同时, 使体系兼具弛豫铁电体的特点, 通常还可提高材料的居里温度。该体系也可进行掺杂改性。如添加 MnCO_3 可将 d_{33} 提高至 450 以上, 但 Q_m 值较低, $\tan\delta$ 较大^[13]。进行“硬性”掺杂可将 Q_m 提高到 1400 以上^[14]。

2.3 四元系大功率压电陶瓷

在三元系材料的基础上添加第四组元的主要工作始于 20 世纪 80 年代。由于铋锰锆钛酸铅及铋锰锆钛酸铅都能获得较高的机械品质因数 Q_m 和较低的介电损耗, 因此四元系大功率压电陶瓷多在“硬性”材料铋锰锆钛酸铅和铋锰锆钛酸铅的基础上添加第四组元, 例如: $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ 、

$\text{Pb}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ 、 $\text{Pb}(\text{Fe}_{2/3}\text{W}_{1/3})\text{O}_3$ 、 $\text{Pb}(\text{Ni}_{1/2}\text{W}_{1/2})\text{O}_3$ 等。第四组元的加入往往可降低烧结温度, 提高致密度、降低烧结温度, 并同时获得软硬性掺杂特征, 这也与 MPB 的存在有关。例如, 加入 PZN 并添加 MnO_2 、 WO_3 及 ZnO , 可制备出 Q_m 接近 2000, 且压电性能较好 ($d_{33}>300$, $k_p>0.55$) 的功率型压电陶瓷^[15]; 加入 PNW 可明显提高压电性能, 但 Q_m 有所下降^[16]。在 PMnN-PZT 加入第四组元 PMN 或 PZN 均可获得 Q_m 值较高的压电陶瓷^[17], 而加入 PNW 可明显提高压电性能。PMN-PZT-PZN 也是一类可获得高 Q_m 值的陶瓷材料, 但其压电性能仍需进一步提高。四元系组成更复杂种类非常繁多, 表 1 总结了作者和其他研究者所获得的众多常见的四元系功率型压电陶瓷的性能参数。

本组的系列研究发现通过调整四元系陶瓷的

综合性能随对不同组分比例及掺杂剂用量的变化而敏感变化^[17], 例如略微调整 PMnN-PMN-PZT 和 PMnN-PFW-PZT 中 PMN 或 PFW 在组分中的比例及掺杂剂用量, 并通过优化合成工艺及极化条件, 不但提高了体系的压电性能, 并使其 Q_m 值大大提高, 损耗由 0.60% 降到 0.20%, 同时, 可获得较高的居里温度 (大于 420°C)。这些结果表明, 多元系制备条件虽然难以控制, 但却可以获得传统 PZT 所不具备的“软硬”兼备的压电特征。另外, 人们对多组分无机固溶体体系的组分与性能强烈非线性关系, 以及其在电场下的非线性极化特性, 及微观结构根源等的了解还远未成熟。这另一方面也表明了多元系压电陶瓷在功率型器件及其他各类压电器件中具有重要的应用价值。然而, 其结构控制和性能稳定性仍需进一步提高。

表 1 常见四元系功率型压电陶瓷及其性能^[15-17]

| | d_{33} | Q_m | $\tan\delta$ (%) | k_p |
|------------------------------|----------|-----------|------------------|-----------|
| PMS-PZN-PZT 掺 W+Ce 或 Zn | 240-300 | 1850-1900 | 0.50-0.63 | 0.55-0.59 |
| PMS-PZT-PMN 掺 Sr | 230-250 | 1000-1300 | 0.40-0.50 | 0.52-0.55 |
| PMS-PZT-PMT | 270-290 | 1600-1900 | 0.80-0.90 | 0.53-0.58 |
| PMS-PNW-PZT | 300-400 | 1200-1300 | 0.45-0.60 | 0.55-0.62 |
| PMnN-PMN-PZT 掺 Ce | 290-310 | 1500-2400 | 0.30-0.50 | 0.50-0.55 |
| PMnN-PZN-PZT 掺 Ce | 250-300 | 2400-2600 | 0.30-0.40 | 0.50-0.55 |
| PMnN-PFW-PZT 掺 Ce、Pb、Bi、Fe、W | 300-360 | 910-2000 | 0.20-0.60 | 0.49-0.64 |
| PMnN-PNW-PZT 掺 Ce | 380-400 | 1300-1450 | 0.50-0.59 | 0.55-0.60 |
| PMN-PZN-PZT 掺 Bi、Zn、Li、Pb | 250-260 | 1800-2000 | 0.50-0.70 | 0.55-0.60 |

3 功率型无铅压电陶瓷

铅的特殊电子结构使其成为压电陶瓷的重要元素, 随着人们对环保要求的提高及大功率压电陶瓷应用领域的扩大, 无铅压电陶瓷在功率型器件中的应用越来越受关注。无铅压电陶瓷的典型代表是均为钙钛矿结构的钛酸钡 (BaTiO_3 , BT), 铌酸钾 ($\text{K}_x\text{Na}_{1-x}\text{NbO}_3$, KNN)、钛酸铋钠 ($\text{Na}_x\text{Bi}_{1-x}\text{TiO}_3$, BNT) 和钛酸铋钾 ($\text{K}_x\text{Bi}_{1-x}\text{TiO}_3$, BKT) 等^[18]。BT 是最早发现的钙钛矿结构压电材料并早已用于声纳, 然而较低的 T_c ($120-135^\circ\text{C}$) 导致了其非常窄的使用温度范围。KNN 的铁电性最早在 1954 年报道, 而之后人们发现 KNN 具有复杂的相结构和多个 MPB, 而含 47.5% NN 的 KNN 具有较高的压电性。然而, 制备困难和比 PZT 弱的压电性限制了其应

用。BNT 和 BKT 的铁电性在上世纪 50 年代末被报道, 其应用也受制于制备困难和低压电性 (小于 100pC/N)。1960 年 Smolenskii 等人首次合成钛酸铋钠^[19]。BNT 也具有复杂的相变, 在室温下是三方铁电相, 在约 230°C 经历弥散相变为反铁电相, 在 320°C 转变为四方顺电相, 而在 520°C 以上为立方相。

这些无铅压电材料本身相对较低的 Q_m (约 50-400) 和较高的介电损耗限制了它们在功率器件上的应用。然而, 与 PZT 类似, 无铅压电陶瓷可通过掺杂来大大改进性能。例如, Li、Ta、Sb 掺杂及织构化的 KNN 具有大于 400pC/N 的 d_{33} , 使这一材料成为研究最多的无铅体系^[20]。Mn、Cu 掺杂可大大提高 KNN 等的 Q_m , 从而用于功率型器件。而 $\text{K}_{5.4}\text{Cu}_{1.3}\text{Ta}_{10}\text{O}_{29}\text{Cu}$ 和 Cu 掺杂的 KNN 体系, 所报道

的 Q_m 可达 300, 且介电损耗只有 0.18%, 但这种“硬性”掺杂使 d_{33} 降为 100pC/N 一下。与掺杂相比, 引起更广泛关注的是这几类无铅材料的众多多元复合体系, 如 KNN-BT, KNN-BNT, BNT-BT, BKT-BT, BNT-KNN, BNT-BT-KNN 等。不同体系可通过形成 MPB 而极大提高压电性, 并同时提高 Q_m 和降低介电损耗。添加 0.3wt%Mn 的 BNT-BT 的 d_{33} 由约 90 提高至 150, 但 Q_m 却有所下降。而 Mn 掺杂的 BNT-(Bi_{1/2}Li_{1/2})/TiO₃-BKT 多元系的 Q_m 可达 1000。

无铅压电材料的一个重要问题是性能稳定性。一方面, 含钠钾钡等碱金属或碱土元素原料的吸水性及其在烧结过程中易挥发, 另外, 其无铅体系具有复杂的相结构。这些都造成了工艺重复性问题。例如, 本组的研究发现, 同组成的 Li 掺杂 BNT-BT 样品的 d_{33} , 受制备及极化工艺的细微变化影响, 可在 20-200pC/N 的范围内剧烈波动。

4 压电晶体材料

压电单晶如石英、铌酸锂、钽酸锂等, 均具有高 Q_m 值, 高居里温度和高稳定性, 然而这些晶体压电性能较差。而弛豫铁电单晶如 PMN-PT 和 PZN-PT 具有非常高的压电常数 (d_{33} 可达 3000)、高灵敏度 ($k_{33}>90\%$) 和低损耗 (0.2-1.0%), 但其机械品质因数通常小于 100, 居里温度低 (140-170℃) 且低的矫顽场强也导致了其稳定性差。另外, 大尺寸、组成复杂的单晶制备比较困难, 制造成本比陶瓷大得多。这些限制了压电单晶在功率型器件中的应用。值得注意的是, 单晶的各种参数很大程度受晶体切向影响, 掺杂也可对性能进行调整。因此, 性能优良单晶的制备结合器件设计, 使得其在功率器件中仍有不可忽视的应用前景。

5 功率性压电材料的应用前景

功率型压电陶瓷的应用日益广泛, 如各类换能器、超声马达、压电陶瓷变压器以及各种超声清洗设备等。功率型陶瓷同时要求高压电常数、高机械品质因子 Q_m 、低损耗等“软硬兼备”的三高一低性能特点, 以及良好力学性能和抗老化性能。无铅压电陶瓷近年来受到广泛关注, 其压电性也有很大提

高。然而, 如前所述, 由于含有大量钠钾钡等碱金属或碱土元素及其复杂的相结构, 其制备工艺稳定性及高温稳定性等成为其进一步使用的一个障碍。对于单晶, 除了性能原因外, 压电单晶在生长技术、大尺寸、掺杂改性以及制造成本等方面都存在一定局限性。因此, 目前使用的功率型压电材料主要是二元和多元系含铅压电陶瓷材料。

从材料制备考虑, 陶瓷组成越简单制备工艺越易控制, 性能也越稳定, 但 PZT 基二元系压电陶瓷通过掺杂改性已很难满足多性能参数的综合要求。如表 1 所示, 基于 PZT 与弛豫铁电体复合的多元系压电陶瓷存在软硬兼备的特点, 能同时获得“三高一低”的性能。其制备将会对提高功率型压电材料的综合性能有重要意义。然而, 组分越多越易引起烧结工艺问题, 易形成不稳定相或非铁电相。另外, 多元系的组成、结构和性能存在一种比二元系固溶体复杂得多的非线性关系, 相关系统规律也非常缺乏, 其理论研究还不深入, 制备还是靠大量的经验摸索。这些表明, 尽管相关研究早已展开, 多元系功率陶瓷的理论研究和性能优化仍然是面临挑战又有机遇。而多元素共掺杂和不同铁电相 MPB 相界组分的设计, 无疑是指引其性能设计的一个重要原则。

参 考 文 献

- [1] YANG J. Piezoelectric transformer structural modeling-a review [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. 2007, 54(6): 1154-1170.
- [2] GEETIKA, UMARJI A M. The influence of Zr/Ti content on the morphotropic phase boundary in the PZT-PZN [J]. Materials Science and Engineering B. 2010, 167: 171-176.
- [3] NOHEDA B, GONZALO J A, CROSS L E, et al. Tetragonal-to-monoclinic phase transition in a ferroelectric perovskite: The structure of PbZr_{0.52}Ti_{0.48}O₃ [J]. Physical Review B. 2000, 61: 8687-8695.
- [4] TOMAS S, ALEXANDER K T, DRAGAN D, et al. Enhanced electromechanical response of ferroelectrics due to charged domain walls [J]. Nature Communication. 2012, 3: 748.
- [5] AHART M, SOMAYAZULU M, COHEN R E, et al. Origin of morphotropic phase boundaries in ferroelectrics [J]. Nature. 2008, 451: 545-548.
- [6] ANDRYUSHINA I N, RENZNICHENKO L A, SHILKINA L A, et al. The PZT system (PbTixZr1-xO3, 0≤x≤1.0): The real phase diagram of solid solutions (room temperature) (Part 2) [J]. Ceramics International. 2013, 39: 1285-1292.
- [7] PARK S E, SHROUT T R. Characteristics of relaxor-based piezoelectric single crystals for ultrasonic transducers [J]. IEEE

- Transactions on Ultrasonics, Piezoelectrics, and Frequency control, 1997, 44(5): 1140-1147.
- [8] ZHU Z, LI G, LI Bao, et al. The influence of Yb and Nd substituents on high-power piezoelectric properties of PMS-PZT ceramics [J]. Ceramics International, 2008, 34: 2067-2072.
- [9] LI L, YAO Y, HAN M. Piezoelectric ceramic transformer [J]. Ferroelectrics, 1980, 28(1): 403-406.
- [10] ISE O, SATOH K, MAMIYA Y. High power characteristics of piezoelectric ceramics in $\text{Pb}(\text{Mn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-PbTiO}_3\text{-PbZrO}_3$ system [J]. Japanese Journal of Applied Physics. 1999, 38: 5531-5534.
- [11] KIM Y M, KIM J C, UR S C. Effects of Al_2O_3 on the piezoelectric properties of $\text{Pb}(\text{Mn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-PbZrO}_3\text{-PbTiO}_3$ ceramics [J]. Journal of Electroceramics, 2006, 16: 347-350.
- [12] TIPAKONTITIKUL R, SUWAN Y, NIYOMPAN A. Effects of MnO_2 addition on the dielectric behaviors of the PZT-PMN ceramics [J]. Ferroelectrics, 2009, 381: 144-151.
- [13] RAHED A I, SHASHANK P, AHMED A. Mn-doping effect on dielectric and electromechanical losses in the system $\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3\text{-Pb}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ [J]. Journal of Materials Sciences, 2007, 42: 10053-10057.
- [14] DENG Y, ZHOU D, ZHUANG Z. Effects of $\text{NaNbO}_3\text{-Co}_2\text{O}_3$ Co-additive on the properties of PZN-PZT ceramics [J]. Journal of Wuhan University of Technology-Materials science edition, 2007, 22(4): 722-724.
- [15] LI H, YANGZ, WEI L, et al. Effect of ZnO addition on the sintering and electrical properties of (Mn,W)-doped PZT-PMS-PZN ceramics [J]. Materials Research Bulletin, 2009, 44: 638-643.
- [16] DU H, PEI Z, ZHOU W, et al. Effect of addition of MnO_2 on piezoelectric properties of PNW-PMS-PZT ceramics [J]. Materials Science and Engineering A, 2006, 421: 286-289.
- [17] LIAO Q, CHU X, ZHANG J, et al. Structural and electrical properties of hard doped PZT-based quaternary piezoelectric ceramic materials for high power applications [C]. Proceedings of the 3rd International Symposium on Advances in Functional Materials. Changchun, China. 2012. 147.
- [18] RÖDEL J, KLAUS W J, SEIFERT T P, et al. Perspective on the development of lead-free piezoceramics [J]. Journal of the American Ceramic Society. 2009, 92(6): 1153-1177.
- [19] SMOLENSKII G A, AGRANOVSKAYA A I. Dielectric polarization of a number of complex compounds [J]. Soviet Physics-Solid State. 1960, 1: 1429-1435.
- [20] SAITO Y, TAKAO H, TANI T, et al. Lead-Free Piezoceramics [J]. Nature, 2004. 432: 84-87.

第 21 届国际声与振动大会 (ICSV21) 将于 2014 年在北京召开

第 21 届国际声与振动大会 (International Congress on Sound and Vibration 简称: ICSV21) 将于 2014 年 7 月 13 日至 17 日在北京国际会议中心组织召。开会议由中国声学学会主办, 田静理事长担任大会主席, 国际声学和振动学会 (IIAV) 协办, 该学会执行主席 Malcolm Crocker 教授和中科院声学所刘碧龙研究员共同担任学术委员会主席。组织委员会主席由声学所杨军研究员担任。会议主题为“深入研究声与振动”。会议包括噪声、振动、NVH、言语声学、音乐声学、声学设备、有源控制等 50 多个议题, 涵盖了声学和振动学科中传统和热点研究方向。

国际声学和振动学会 (International Institute of Acoustics and Vibration, IIAV) 正式成立于 1995 年, 隶属于国际理论和应用力学协会, 是致力于推动声学和振动科学研究的国际性学术组织, 特别关注声学及流体及固体力学的交叉领域的研究交流, 与世界各国的研究机构和众多的国际性学术组织都有密切的关系。目前已经有全球 37 个相关的国际或国家学会组织成为其合作会员, 在国际声学与振动学界有着广泛的影响。我国著名学者马大猷及田静被该学会授予荣誉会士 (Honorary Fellow) 称号。

ICSV 是由 IIAV 发起组织的声学与振动研究方面的系

列国际学术会议, 从 1994 年开始, 每年举行一次, 迄今已举办了 20 届, 每届会议的参加人数在 400~800 人之间, 同时会议还展出声学与振动研究方面最新的仪器设备产品和技术。

近 10 年中国的经济、社会和科学技术研究都发生了巨大变化, 而且国际同行对我国的声学与振动等研究认可度不断提高, 纷纷表示愿意来中国交流, 并了解中国的市场。因此承办该会议不仅可以促进中国声学专家和世界各国声学专家的交流, 缩短国内与国际在声学与振动研究方面的差距, 而且能够通过会议的承办扩大中国声学学会在国际声学界的影响。

2010 年 7 月 18~22 日, 中国声学学会理事长田静曾率团赴埃及首都开罗参加了国际声学与振动学会 (IIAV) 理事会和第 17 届国际声与振动大会 (ICSV17), 代表中国声学学会和中国科学院声学研究所, 向该理事会提出了承办 2014 年第 21 届国际声与振动大会 (ICSV21) 的申请, 获得国际声学与振动学会 (IIAV) 理事会批准。

(中国科学院声学研究所 程晓斌)