

铅基织构压电陶瓷研究进展

吴琼¹, 沈炳林², 张茂华², 姚方周², 邢志鹏¹, 王轲¹

(1. 清华大学 材料学院, 新型陶瓷材料全国重点实验室, 北京 100084; 2. 乌镇实验室, 嘉兴 314500)

摘要: 铅基织构压电陶瓷因其制备成本远低于单晶且性能显著高于非织构压电陶瓷, 被视为最有潜力的铅钛酸铅多晶陶瓷替代者, 成为近年来材料领域的重点研究课题。基于过去数十年的研究进展, 本文详细介绍了铅基织构压电陶瓷的生长原理与表征方法、模板的制备工艺与铅基织构压电陶瓷制备过程中的关键工艺, 进而全面汇总了具有代表性的铅基织构压电陶瓷研究成果, 讨论了不同改进策略的特点。从材料配方的角度来看, 三元体系与二元体系织构压电陶瓷的各组分比例通常选择在相界处, 使各极性态在外电场下较易翻转, 进而获得高压电系数(d_{33})。虽然两种体系的 d_{33} 接近, 但三元体系的居里温度普遍高于二元体系, 体现出更高的应用价值。从烧结等制备工艺的角度看, 添加助烧剂可以显著促进晶粒定向生长, 后退火处理可以消除晶界和孔洞缺陷内的杂相, 淬火处理可以使电偶极子从无序状态中固定。这些改善工艺都显著增强了铅基织构压电陶瓷的性能。最后, 本文分析了目前存在的问题与发展的挑战, 认为模板与基体材料的晶格参数和 B 位离子价态的差异是限制铅基织构压电陶瓷性能提升的主要原因, 针对不同基体材料定制匹配性好的模板将有助于进一步改善其性能。

关键词: 织构压电陶瓷; 钛酸钡模板; 晶粒取向; 晶格失配; 相界; 综述

中图分类号: O482 文献标志码: A 文章编号: 1000-324X(2025)06-0563-12

Research Progress on Lead-based Textured Piezoelectric Ceramics

WU Qiong¹, SHEN Binglin², ZHANG Maohua², YAO Fangzhou², XING Zhipeng¹, WANG Ke¹

(1. State Key Laboratory of New Ceramic Materials, School of Materials Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Wuzhen Laboratory, Jiaxing 314500, China)

Abstract: Lead-based textured piezoelectric ceramics have significantly lower production costs compared to single crystals with performance that notably exceeds that of non-textured ones. They are regarded as the most promising alternative to lead zirconate titanate polycrystalline ceramics and have emerged as a key research topic in the materials science field in recent years. This paper provides a comprehensive overview of the growth principles and characterization methods for lead-based textured piezoelectric ceramics, including the preparation processes for templates, and the essential steps involved in production of these ceramics. Then, it summarizes representative research findings on lead-based textured piezoelectric ceramics and systemizes various improvement strategies. From the perspective of material formulation, the component ratios of ternary and binary system textured piezoelectric ceramics are typically chosen at the phase boundary to ease flipping of polar states under an external electric field,

收稿日期: 2024-12-16; 收到修改稿日期: 2025-02-14; 网络出版日期: 2025-02-19

基金项目: 国家自然科学基金(52421001, 52325204)

National Natural Science Foundation of China (52421001, 52325204)

作者简介: 吴琼(1993-), 男, 博士. E-mail: wu-qiong@mail.tsinghua.edu.cn

WU Qiong (1993-), male, PhD. E-mail: wu-qiong@mail.tsinghua.edu.cn

通信作者: 王轲, 研究员. E-mail: wang-ke@tsinghua.edu.cn

WANG Ke, professor. E-mail: wang-ke@tsinghua.edu.cn

thereby achieving a high piezoelectric coefficient (d_{33}). Both systems exhibit similar d_{33} , but Curie temperature of the ternary system is generally higher than that of the binary system, indicating greater application potential. From the perspective of preparation processes, the addition of sintering aids can significantly promote oriented growth of grains and post-annealing can eliminate impurities at grain boundaries and void defects. Moreover, quenching can freeze the electric dipoles from a disordered state. These improvements in processing have significantly enhanced the performance of lead-based textured piezoelectric ceramics. Finally, this paper analyzes the current issues and developmental challenges, concluding that differences in lattice parameters and valence states of B-site ions between the template and the matrix material are the primary factors limiting the performance of lead-based textured piezoelectric ceramics. Customizing templates that match well with different matrix materials will further improve their performance.

Key words: textured piezoelectric ceramic; BaTiO₃ template; grain orientation; lattice mismatch; phase boundary; review

压电材料作为力电信号相互转化的载体,其应用贯穿整个现代工业社会的各个领域。从日常生活中的打火机点火装置到导弹的爆炸系统触发引信^[1-2],从简单的压力与加速度传感器到核潜艇使用的水下超声换能器^[3-7],从单模态惯性致动组件到多模态耦合的纳米级超高精度多维移动平台^[8-11],再到近几年备受关注的能量收集器^[12-16]及压电驱动的超低频电磁信号传输系统^[17-18],无一不体现出压电材料的重要价值。据报道,2023 年中国压电材料市场规模达到 237.99 亿元^[19],并呈现快速增长的趋势。压电材料广泛应用的原因不仅在于其可以实现力电信号的相互转化,还因为自然界及工业环境中可产生力或电的方式有很多种。例如,除了人为施加的应力与电场,风、水流、汽车行驶和物体震动等^[20-22]均可转化成应力并施加在压电材料上。而光生电^[23]和热生电^[24-25]等现象也可以成为压电材料发生应变的条件。

压电材料常见形态包括单晶、陶瓷、薄膜与聚合物,其中,压电陶瓷因制备工艺简单、综合成本低、性能适中等特点被广泛应用。然而,随着压电性能不断优化,研究者们发现其性能难以进一步大幅提升。20 世纪末,得益于制备工艺的突破,压电单晶问世^[26-27],其 d_{33} 接近 2000 pC/N,电致应变达到 1.7%,机电耦合系数 k_{33} 高达 90%,显著优于同组分的多晶陶瓷。这种优异性能源于其内部高度取向的晶粒所导致的各向异性。

虽然单晶具有出众的综合压电性能,但其昂贵的生产成本和组分分凝导致的均一性较差限制了其广泛应用。为了解决单晶的缺陷,并兼顾优异的性能,织构压电陶瓷应运而生。“织构”是用来描述多晶陶瓷中晶粒特定取向的状态。织构压电陶瓷不仅

具有多晶陶瓷的低生产成本和高均一性,还具有晶粒择优取向显著而提升的综合压电性能。首先,织构压电陶瓷的压电系数和机电耦合系数均显著提高,前者一般为非织构压电陶瓷的 2~5 倍,而后者接近单晶水平。其次,织构压电陶瓷表现出高的 $g_{33} \cdot d_{33}$ 值(d_{33} 为压电电流系数, g_{33} 为压电电压系数,等于 d_{33} 与对应介电常数 ϵ_{33} 之比),这对于高能量密度能量采集器与传感器至关重要^[28-29]。一般来说,从多晶到织构再到单晶,随着各向异性的程度增加, d_{33} 与 ϵ_{33} 均逐渐增大。但在织构陶瓷中,由于存在低介电常数钛酸钡模板和较大的晶粒尺寸,其介电常数相对较低,因此 $g_{33} \cdot d_{33}$ 值较高^[30]。近年来,国内外学者在制备高性能织构压电陶瓷方面开展了大量研究。通过优化模板的质量与制备工艺提升织构度,或改进材料的配方调控多相共存的高熵材料,这些方法均在一定程度上改善了织构压电陶瓷的性能。但目前织构压电陶瓷的性能仍难以达到单晶水平,尚需进一步研究。

本文聚焦高性能铅基织构压电陶瓷,详细介绍了近些年的发展情况,总结了主要优化策略,分析了存在的不足并对未来的发展趋势进行了展望。

1 织构压电陶瓷生长原理和表征方法

织构压电陶瓷中的晶粒沿着某一特定方向生长,通常为<001>方向。图 1 为普通陶瓷、织构陶瓷和单晶的微观结构示意图。普通陶瓷内部晶粒大小不一,排列方向各异;织构陶瓷的晶粒取向高度一致,晶粒尺寸较为均一,但仍存在晶界;单晶的晶粒取向理论上完全一致,内部不存在晶界。

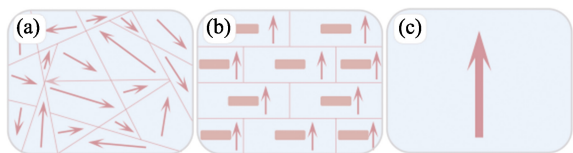


图1 (a)普通陶瓷、(b)织构陶瓷与(c)单晶的微观结构示意图
Fig. 1 Schematic diagrams of microstructures of (a) conventional ceramics, (b) textured ceramics and (c) single crystals

1.1 织构压电陶瓷的生长原理

织构压电陶瓷的性能可以达到同组分单晶的60%~80%。在烧结过程中,为了确保晶粒生长的驱动力方向始终一致,研究者们采用了多种技术手段,如强磁场定向^[31-34]、热压烧结^[35-38]、模板晶粒生长(Templated Grain Growth, TGG)^[39-42]与反应模板晶粒生长(Reactive Templated Grain Growth, RTGG)^[43-46]等。

目前,采用TGG或RTGG技术制备织构压电陶瓷的研究较多,但RTGG仅适合特定的材料体系,缺乏普适性。相比之下,TGG不仅普适性较高,而且具有工艺简单、可重复性好、易于工业化等特点,因此成为制备织构压电陶瓷的首选方案。

TGG法的关键步骤是将片状模板引入浆料,借助流延工艺制备生瓷带。通过精确控制仪器刮刀高度与流延速率,片状模板被挤压并均匀地平铺在生瓷带的基体中。接着经过切割、叠层、等静压成形、生切等过程获得生坯,烧结后便可获得织构陶瓷^[47]。图2展示了织构陶瓷在不同阶段的内部结构示意图。烧结前(图2(a)),生坯的内部结构与流延干燥后的生瓷带相同,此时模板沿流延方向均匀地平铺在生瓷带中。在烧结过程中(图2(b)),随着环境温度逐渐升高,晶粒逐渐长大,模板和基体材料之间的接触面积增大,当模板与基体材料之间的表

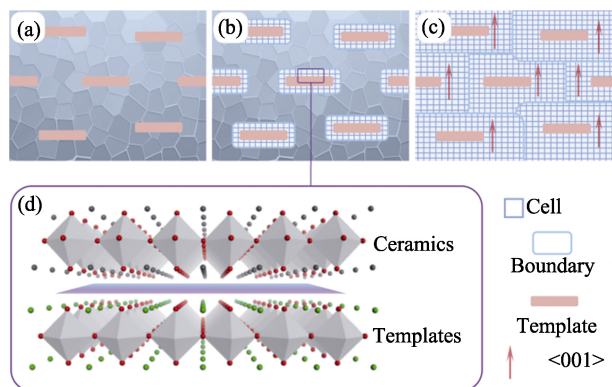


图2 TGG法制备织构陶瓷在(a)烧结前、(b)烧结中、(c)烧结后以及(d)模板与陶瓷接触界面的内部状态示意图
Fig. 2 Schematic diagrams of the internal state of textured ceramics prepared by TGG method (a) before, (b) during, (c) after sintering and (d) at the interface between template and ceramic

面自由能差值达到一个阈值时,基体材料将会沿着模板的低表面能界面外延生长形核并定向生长^[30,48]。烧结完成后(图2(c)),织构压电陶瓷中晶粒以模板为中心完全生长,每个晶粒内部无限接近单晶的状态。但与单晶相比,织构陶瓷内部依然存在晶界,晶界处会存在空隙和多余氧化物,这也是其压电性能仅为单晶60%~80%的原因。

1.2 织构压电陶瓷的表征方法

通常用织构度来衡量织构压电陶瓷的晶粒取向程度,其数值越接近单晶的理论值100%则表明取向越好。1960年, Lotgering^[49]提出了一种方法,根据陶瓷样品的X射线衍射峰的强度与晶粒取向之间的关系,利用衍射数据来计算织构度。计算公式如下:

$$F_{001} = \frac{P - P_0}{1 - P_0}, P = \frac{\sum I_{(001)}}{\sum I_{(hkl)}}, P_0 = \frac{\sum I_{0(001)}}{\sum I_{0(hkl)}} \quad (1)$$

其中, $I_{(001)}$ 与 $I_{0(001)}$ 分别是织构压电陶瓷与随机取向陶瓷的(001)衍射峰强度, $I_{(hkl)}$ 与 $I_{0(hkl)}$ 分别是织构压电陶瓷与随机取向陶瓷的所有衍射峰强度,织构度 F_{001} 介于随机取向陶瓷的0与单晶的100%之间。Lotgering法操作简单、快捷方便,仅需陶瓷样品的X射线衍射数据即可评估样品的晶粒取向。不过,X射线衍射测试结果受多种因素影响,如样品表面的平整度、残余应力和晶粒大小等,以及仪器参数如扫描速度、靶材特性、环境温度等。目前报道中,根据Lotgering法计算的织构压电陶瓷的 F_{001} 几乎都达到了99%左右,但摇摆曲线的半高宽处于5°~8°范围内,远高于单晶水平(<1°)。同时,背散射电子衍射也显示织构压电陶瓷中的晶粒取向并非完全一致。所以,应采用多种表征方法准确评估织构压电陶瓷的晶粒取向程度,不能仅采用Lotgering法。

2 织构压电陶瓷的制备工艺

目前主流的织构压电陶瓷制备流程与多层共烧压电陶瓷相似,不同在于缺少后者的印刷电极步骤。此外,在流延之前,需在浆料中加入片状模板,搅拌均匀后进行流延。织构压电陶瓷制备流程极长且难度较大,每个步骤都至关重要。

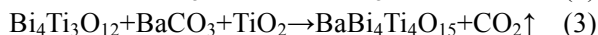
2.1 模板的合成与发展

不同体系的织构压电陶瓷对模板的选取各有侧重,铌酸钾钠基织构压电陶瓷通常选用片状 NaNbO_3 作为模板,而铅基织构压电陶瓷通常选取片状钛酸钡(BaTiO_3 , BT)作为模板。

TGG法采用的模板需满足以下几点要求。(1)模

板的化学性质稳定,尤其是在高温下不与基体材料发生反应。例如,铅基织构压电陶瓷选择片状 BT 而非结构相似的 SrTiO_3 作为模板,这是因为 SrTiO_3 在高温下容易溶解于基体材料中。(2)模板需要具有较大的长厚比。晶粒的定向生长依赖于模板与基体材料表面自由能的差异,因此模板与基体材料的尺寸形貌密切相关。研究发现,模板与基体材料粒径的比值应大于 $20^{[48]}$,以获得足够的表面自由能差促使晶粒定向生长。目前,铅基织构压电陶瓷所用的 BT 模板的表面积通常约为 $10\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$,厚度为 $0.5 \sim 1\ \mu\text{m}$ 。同时,为了获得足够的表面自由能差,基体材料的粒径要尽量小,因此通常采用纳米级氧化物,并利用高能球磨进一步细化。目前多数研究报道的基体材料粒径在 $300 \sim 500\ \text{nm}$ 范围内。(3)模板与基体材料的晶格常数接近。除了模板与基体材料粒径的比值要大于 20,在织构陶瓷生长过程中,模板与基体材料的晶格参数不匹配也严重影响晶粒的取向生长。通常认为,模板与基体材料的晶格失配应小于 10%,以实现局部的取向生长。否则,界面应力会改变晶粒的生长方向,从而降低织构度^[48]。

目前铅基织构压电陶瓷用的模板多采用熔盐法制备,利用拓扑化学原理将 Aurivillius 化合物转化成片状钙钛矿结构^[50]。Aurivillius 化合物的通用分子式为 $(\text{Bi}_2\text{O}_2)^{2+}(\text{A}_{m-1}\text{B}_m\text{O}_{3m+1})^{2-}$,其中, m 为类钙钛矿的层数,通常在 1~6 之间^[51-54]。 $(\text{Bi}_2\text{O}_2)^{2+}$ 层与类钙钛矿层交替存在,形成多层的片状三明治结构。 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}(\text{BIT})$ 是典型的 $m=3$ 的 Aurivillius 化合物,也是制备 BT 模板的第一步合成产物。图 3 展示了常见的三步法制备 BT 模板的流程,包含如下三个化学反应:



其中, BIT 与 BT 是在 NaCl 与 KCl 混合盐中合成的,而 $\text{BaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}(\text{BBT})$ 是在 BaCl_2 与 KCl 混合盐中合成的。值得注意的是,在 BBT 转化为 BT 的拓

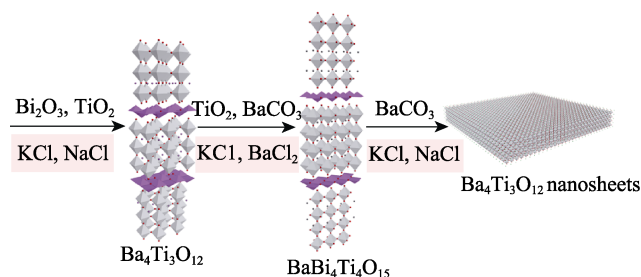


图 3 BT 模板的制备流程

Fig. 3 Preparation process of BT template

扑化学反应中,加入的 BaCO_3 含量通常为理论值的 2~3 倍,以确保有足够多的 Ba^{2+} 离子置换 Bi^{3+} 。此外,两步法也常用来制备 BT 模板,省略了三步法中 BBT 的合成,即直接用 BIT 进行制备。许多 Aurivillius 化合物都可以经过原位转化反应生成片状钙钛矿结构,但其反应焓变不同。有的转化反应迅速,释放的焓热过大,难以保留原来的形貌。三步法中,BBT 的类钙钛矿层中存在 $1/3$ 的 Ba^{2+} ,所以反应较为缓慢,形成的 BT 表面更光滑且结构更规则。

目前,几乎所有铅基织构压电陶瓷均采用 BT 模板进行制备,但不同的基体材料体系与 BT 的晶格常数存在差异。因此需要对 BT 模板进行掺杂改性,在不影响其高温稳定性的条件下,使其与基体材料的晶格常数更为接近。如 Li 等^[55]在 BT 中掺杂微量的 Zr 元素,制备了 $\text{Ba}(\text{Zr}_{0.1}\text{Ti}_{0.9})\text{O}_3$ 模板。利用该模板制备的 $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.4}\text{Ti}_{0.6})\text{O}_3$ 织构陶瓷展现出优异的压电性能。此外,BT 模板的长厚比仍需提升,长厚比较低会导致陶瓷需要较多的 BT 模板才能获得较高的织构度,但 BT 较多又会降低陶瓷的介电常数,从而影响压电性能。因此,大长厚比 BT 模板的制备也是目前的挑战之一。

2.2 关键制备工艺

织构压电陶瓷的制备工艺与多层共烧陶瓷的制备工艺类似,制备流程长且工艺难度大。主要流程包括粉末制备、浆料配制、流延、切割、叠层、等静压、生切、烧结、外电极制备等^[56],如图 4 所示,每个步骤对于最终样品的性能至关重要。

为了增加表面自由能差,基体材料粉末的粒径应与 BT 模板的尺寸有较大差距,因此需要通过高能球磨或长时间球磨来减小粉末粒径。Yang 等^[57]在流延之前对粉末进行了 72 h 球磨,成功将粒径减小到约 $340\ \text{nm}$ 。

配制流延浆料需将粉末与有机溶剂、增塑剂、黏结剂、分散剂等混合,并球磨至均匀。常见的有机溶剂有酒精、甲苯、2-丁酮和异丙醇等,黏结剂常为聚乙烯醇缩丁醛(PVB)和聚乙烯醇(PVA)等,其

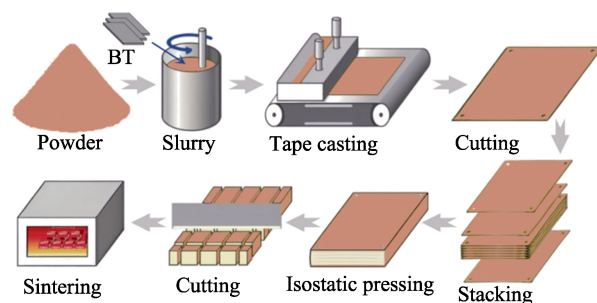


图 4 织构压电陶瓷的制备流程^[56]

Fig. 4 Preparation process of textured piezoelectric ceramics^[56]

他添加剂也各不相同。流延是整个工序中的关键步骤,高质量的生瓷带是制备织构压电陶瓷的基础。制备厚度均一、致密度高的生瓷带与流延仪器的多个参数相关,如刮刀高度、流延速率、浆料黏稠度、烘干温度与进风速率等。生瓷带的厚度 d_{tape} 可依据以下公式简单估算^[58]:

$$d_{\text{tape}} = \left[\frac{2(h_0/2)^{1/n+2}(\Delta p)^{1/n}}{L(1/n+2)k^{1/n}U} + \frac{1}{2}h_0 \right] \frac{\rho_s \alpha \beta}{\rho_{\text{tape}}} \quad (5)$$

其中, h_0 为刮刀高度, k 和 n 是流体常数, Δp 为浆料槽中的压力梯度, L 为沟道长度, U 为流延速率, ρ_s 与 ρ_{tape} 分别为浆料和生瓷带的密度, α 与 β 为修正因子。为了得到预期厚度的生瓷带,必须严格控制各工艺参数。优质的生瓷带应膜带平整且厚度均匀,否则局部厚度与致密度不均一会严重影响织构压电陶瓷的性能。

将获得的生瓷带切割成预定大小后进行叠层。接着,对叠层后的整个巴块进行等静压处理,旨在减小生瓷带之间的缝隙,使各层生瓷带紧密黏接在一起。等静压的压力要控制在一定范围内,压力过小达不到预期效果,压力过大则会使生瓷带变形,影响内部模板。随后切割巴块得到样品。此时样品内部残留大量有机物,不能直接烧结,需要进行预排胶处理。必须严格控制排胶的温度,温度过低达不到预期效果,温度过高则可能导致样品过早瓷化。

织构陶瓷的烧结条件不同于多晶陶瓷,主要体现在烧结时间上。前者需要较长时间以促使晶粒取向生长,而多晶陶瓷只需要足够的能量促使晶粒长大以获得理想的致密度,因此需要的时间较短。如 Bian 等^[59]制备的织构陶瓷在烧结时需保温 5 h,而相同体系的非织构陶瓷只需 3 h 就能完成烧结。Yang 等^[57]制备的织构陶瓷烧结了 10 h,而同体系的非织构压电陶瓷仅需烧结 2 h。

3 铅基织构压电陶瓷的研究现状与发展前景

织构法显著提高了压电陶瓷的性能,包括压电常数、机电耦合系数等。研究者们对无铅和铅基体系都进行了织构研究,发现无铅体系虽然对环境更友好,但氧化铌的资源提取、加工及其排放的污染物同样会对人类健康和生态环境产生影响^[60]。铅基体系的性能明显更优,仍是目前市场最主要的产品。常见的铅基体系主要分为二元与三元体系。

3.1 二元体系铅基织构压电陶瓷

二元体系铅基织构压电陶瓷的研究主要集中在 $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-PbTiO}_3$ (PMN-PT) 体系,其它如 $\text{Pb}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-PbTiO}_3$ (PZN-PT) 体系也有报道。1982 年, Kuwata 等^[61]首次报道了 PMN-PT 单晶,随后 Park 和 Shrout^[26]系统研究了该体系的压电特性。得益于其超高的 d_{33} , PMN-PT 成为最早用于制备铅基织构压电陶瓷的体系。

图 5 展示了 PMN-PT 体系中不同 PT 含量(摩尔分数)与不同温度下各相的存在条件。可以看到,随着 PT 含量的增加, R 相(Rhombohedral, R)与 T 相(Tetragonal, T)的共存温度逐渐降低^[62]。为了确保在室温范围内实现两相共存, PT 含量通常控制在 30%(摩尔分数)左右。表 1 全面汇总了该体系中代表性铅基织构压电陶瓷的性能^[63-72]。

2012 年, Yan 等^[64]用体积分数 1% 的 BT 模板制备了 PMN-0.325PT 织构压电陶瓷, F_{001} 达到 98%, d_{33} 为 1000 pC/N, 损耗($\tan\delta$)仅为 0.006, 重要的是, 最高介电常数对应温度(T_m)达到 160 °C。在超声换能器等应用中, 压电陶瓷不仅要满足 d_{33} 的要求, 因其工作于谐振状态, 还需具备较高的机械品质因数 Q_m 。2018 年, Berksoy-Yavuz 等^[65]通过掺杂摩尔分数 0.7% 的 Mn 元素, 制备了 PMN-0.325PT 织构压电陶瓷, 其 $\tan\delta$ 仅为 0.0044, Q_m 达到 175, 显著高于未掺杂样品, 提高了其在谐振状态下的稳定性。此外, 该体系的 k_{33} 和 T_m 是 PMN-PT 体系已有报道的最高值, 分别为 91% 和 165 °C。

提升 d_{33} 一直是织构压电陶瓷发展的主要目标之一。稀土元素如 Sm、Eu 等能够增强局部异质性, 从而改善压电性能^[73-74]。2021 年, Jia 等^[66]制备了摩尔分数 1.9% Sm 元素掺杂的 PMN-0.3PT 织构压电陶瓷, 其 d_{33} 高达 1040 pC/N。但该体系的 T_m 仅为 90 °C, 这限制了其应用。此外, 为了获得较高的 F_{001} , BT 模板的添加量较高, 达到 5%(摩尔分数)。2022 年,

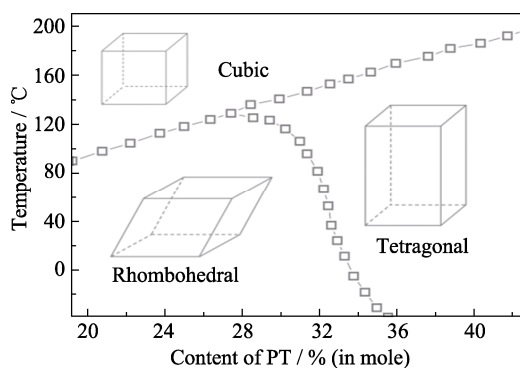


图5 PMN-PT 体系相图

Fig. 5 Phase diagram of PMN-PT

表 1 二元体系 PMN-PT 织构压电陶瓷的性能^[63-72]
Table 1 Electric properties of PMN-PT textured piezoelectric ceramics^[63-72]

System	Template	$F_{001}/\%$	ϵ_{33}	Random $d_{33}/(\text{pC}\cdot\text{N}^{-1})$	Textured $d_{33}/(\text{pC}\cdot\text{N}^{-1})$	$T_{\text{m}}/^\circ\text{C}$	$\tan\delta$	Year	Ref.
PMN-0.285PT	NBT-0.6PT	87	3490	—	855	129	0.01	2011	[63]
PMN-0.325PT	1% BT	98	2591	—	1000	~160	0.006	2012	[64]
Mn-doped PMN-0.325PT	1% BT	96	2233	455	450	~165	0.0044	2018	[65]
Sm-doped PMN-0.3PT	5% BT	90	~4500	—	1040	90	0.05	2021	[66]
CuO/B ₂ O ₃ sintered PMN-0.28PT	1% BT	99.5	3450	340	1180	~150	0.008	2021	[67]
Sm-doped PMN-0.29PT	5% BT	82	5130	500	810	102	0.056	2021	[68]
PMN-0.31PT	3% BT	93	3560	660	1020	134	0.019	2022	[69]
Eu-doped PMN-0.28PT	2% BT	98	~6000	1300	1950	~80	0.015	2022	[70]
Sm-doped PMN-0.26PT	1% BT	99	10115	1245	1882	76	0.042	2023	[71]
Er-doped PMN-0.33PT	5% BT	36.4	~5000	—	634	~100	~0.02	2023	[72]

Yan 等^[70]制备了摩尔分数 2.5% Eu 元素掺杂的 PMN-0.28PT 织构压电陶瓷, 得益于局部异质性的增强, 该体系获得了目前为止最高的 d_{33} (1950 pC/N)。 d_{33} 通常是在小信号下测试的, 为了更准确地评估织构陶瓷的压电性能, 需要在大信号下测试其有效压电系数 d_{33}^* 。在频率为 1 Hz 的 1.5 kV/cm 外电场下, 该体系织构陶瓷的 d_{33}^* 达到 2100 pm/V, 显示出优异的电致应变特性。

理论研究表明, [001]取向的 R 相具有最高的 d_{33} ^[75]。2023 年, Tang 等^[71]将 PMN-PT 体系中 PT 的含量降低至 0.26, 确保了 R 相的相对含量。在此基础上, 引入 Sm 元素增强局部异质性, 制备了摩尔分数 2.5% Sm 元素掺杂的 PMN-0.26PT 织构压电陶瓷。该体系仅用体积分数 1% 的 BT 模板, 便使 F_{001} 达到 99%, 同时 d_{33} 达到 1882 pC/N。此外, 该体系的 d_{33}^* 是迄今为止 PMN-PT 体系已有报道的最高值, 在频率为 1 Hz 的 2.5 kV/cm 外电场下, d_{33}^* 达到 2510 pm/V。然而, R 相到 T 相的转变温度 $T_{\text{R-T}}$ 与 T_{m} 分别为 37 与 76 °C, 其应用场景可能较少。

织构压电陶瓷的性能不仅依赖于基体材料的自身性能, 制备工艺参数也起着重要作用。2022 年, Moriana 等^[69]通过控制流延速率与刀架高度来改变 BT 模板的排列密度, 探究了不同工艺条件下织构陶瓷的晶粒取向。研究发现, 较大的刀架高度与较慢的流延速率有利于模板的整齐排列, 从而促使织构陶瓷中晶粒取向高度一致。烧结条件也是影响织构压电陶瓷性能的主要因素之一, 在烧结过程中, 除了需要充足的烧结时间, 通常还会添加少量的助烧剂促进晶粒生长。2021 年, Yang 等^[67]制备 PMN-0.28PT 织构压电陶瓷时, 在流延浆料中添加了质量分数 0.25% 的 CuO/B₂O₃ 混合物作为助烧剂,

当 BT 模板体积分数仅为 1% 时, F_{001} 便达到 99.5%, d_{33} 则高达 1180 pC/N。同时, $T_{\text{R-T}}$ 与 T_{m} 均保持在较高水平, 分别为 106 与 150 °C, 显示出优异的综合性能。

3.2 三元体系织构压电陶瓷

三元体系织构压电陶瓷的发展主要源于 PMN-PT 等二元体系较低的 T_{m} 。虽然二元体系展现出优异的 d_{33} , 但其 T_{m} 在 75~165 °C 之间, 而且更低的 $T_{\text{R-T}}$ 使其在实际应用中受到限制, 尤其是在超声换能器和致动器等领域。由于谐振状态会使陶瓷温度迅速上升, 当温度达到 $T_{\text{R-T}}$ 时, 陶瓷结构转变, 显著降低了压电性能。为此, 在陶瓷中引入 In、Zr、Sc 等元素, 可以提高 $T_{\text{R-T}}$ 与 T_{m} , 从而增强性能的温度稳定性。

PbZrO₃(PZ)常用作第三组分添加到 PMN-PT 体系中, 形成 PMN-PZ-PT 三元体系。表 2 较为全面地汇总了 PMN-PZ-PT 三元体系织构压电陶瓷的性能^[76-85]。图 6 展示了该体系的相图, 为了获得优异的压电性能, 各组分的含量通常选择靠近相界的位置。2013 年, Yan 等^[77]用体积分数 5% 的 BT 模板制备了 PMN-0.25PZ-0.35PT 体系织构压电陶瓷, 获得了 1100 pC/N 的 d_{33} , 在 20 kV/cm 外电场下, d_{33}^* 达到 1200 pm/V。更重要的是, 该体系的 T_{m} 达到 204 °C, 显示出较好的实用价值。2022 年, Zate 等^[78]在保持 PMN 组分含量不变的情况下, 增加了 PT 含量, 制备了 PMN-0.22PZ-0.38PT 体系织构压电陶瓷, 将 T_{m} 进一步提高到 235 °C, 同时 d_{33} 为 950 pC/N。

常用 CuO 来改进压电陶瓷的 Q_{m} , 以保持其在谐振状态下的稳定性。2022 年, Liu 等^[79]在 PMN-0.25PZ-0.33PT 体系中掺入质量分数 0.50% 的 CuO。通常, BT 模板在流延或烧结过程中会有一定损坏, 但添加 CuO 显著促进了陶瓷的[001]取向的晶

表 2 三元体系 PMN-PZ-PT 织构压电陶瓷的性能^[76-85]

Table 2 Electric properties of PMN-PZ-PT textured piezoelectric ceramics^[76-85]

System	Template	$F_{001}/\%$	ε_{33}	Random $d_{33}/(\text{pC}\cdot\text{N}^{-1})$	Textured $d_{33}/(\text{pC}\cdot\text{N}^{-1})$	$T_{\text{m}}/^\circ\text{C}$	$\tan\delta$	Year	Ref.
Mn-doped PMN-0.25PZ-0.35PT	3% BT	93	—	230	720	210	0.003	2012	[76]
PMN-0.25PZ-0.35PT	5% BT	90	2310	230	1100	204	—	2013	[77]
Quenched PMN-0.25PZ-0.35PT	5% BT	92	1815	275	750	265	0.01	2019	[82]
PMN-0.22PZ-0.38PT	5% BT	98	1100	~250	950	235	—	2022	[78]
PMN-0.25PZ-0.35PT	2% BT	98	1000	230	1470	~225	0.011	2022	[81]
CuO sintered PMN-0.25PZ-0.33PT	5% BT	98	1720	235	860	222	0.008	2022	[79]
PMN-0.25PZ-0.33PT	5% BT	98	1500	—	1080	~225	—	2023	[83]
Mn-doped PMN-0.25PZ-0.35PT	2% BT	99	2100	223	862	—	~0.003	2023	[84]
CuO sintered PMN-0.47PZ-0.39PT	1% BT	92	1000	143	278	304	~0.007	2023	[80]
PMN-PZ-PT	3% BT	98	2410	—	1220	229	0.012	2024	[85]

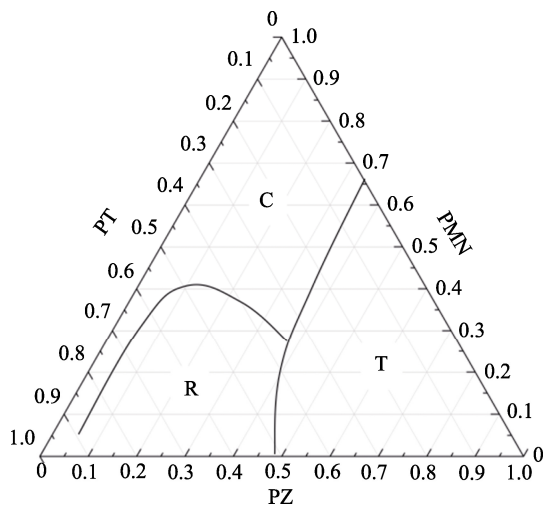


图 6 PMN-PZ-PT 体系相图

Fig. 6 Phase diagram of PMN-PZ-PT

粒生长,使 F_{001} 从 86%提高到 98%。晶粒取向生长和 CuO 掺杂增加了织构陶瓷的 T 相含量,减小了以 R 相为主的电畴尺寸。最终,相较于未掺杂的织构陶瓷, d_{33} 和 $d_{33}\cdot g_{33}$ 分别提高了 3.7 与 6.6 倍,达到 860 pC/N 和 $48.6\times 10^{-12}\text{ m}^2/\text{N}$ 。2023 年, Kim 等^[80]首先在 PMN-0.47PZ-0.39PT 多晶陶瓷中引入了质量分数 0.1% 的 CuO,使 Q_{m} 和 T_{m} 分别达到 3016 与 309 $^\circ\text{C}$ 。随后,采用体积分数 1% 的 BT 模板制备该体系的织构陶瓷,织构化的 d_{33} 为 278 pC/N, Q_{m} 依然保持在 1400 的高水平。在稳定性测试中,由于 T_{m} 较高, d_{33} 与机电耦合系数在 225 $^\circ\text{C}$ 以下保持不变。

机电耦合系数在织构压电陶瓷的应用中至关重要,代表了机械能与电能相互转化的效率。机电耦合系数越高,意味着能量转换过程中损耗的能量越少。2022 年, Yan 等^[81]通过相场模拟结合实验论证,研究了织构压电陶瓷中高机电耦合系数的调控机制及其微观起源。首先,基于朗道理论,相场模拟发现织构压电陶瓷中晶粒的高度取向导致形成了内部

非 109 $^\circ$ 畴壁,有利于获得高机电耦合系数,而这在多晶陶瓷中并不存在。随后,研究团队制备了 PMN-0.25PZ-0.35PT 体系织构压电陶瓷,获得了高达 93%与 65%的 k_{33} (纵向机电耦合系数)与 k_{31} (横向机电耦合系数)。在随后的理论分析中发现, B 位阳离子与氧之间通过 d-p 轨道杂化形成的强共价键对机电耦合系数贡献最大。这一发现为开发下一代超高压电、低成本的高性能压电材料提供了一种新的设计策略。

在烧结工艺的改善中, 淬火有助于提升陶瓷的压电性能。2019 年, Dursun 等^[82]对 PMN-0.25PZ-0.35PT 体系的织构压电陶瓷进行了淬火处理,以改善其压电性能。在高于居里温度淬火后,该体系的压电性能提升了近两倍。这种增强现象归因于缺陷偶极子在温度骤降过程中从随机分布的状态中冻结,阻碍了其钉扎效应。最终,淬火工艺使 d_{33} 从 190 pC/N 增加到 750 pC/N,相对介电常数 ε_{r} 从 860 增加到 1615。2024 年, Zhang 等^[85]研究了后退火工艺对织构压电陶瓷性能的改善机制。在织构陶瓷的制备过程中,通常会在流延浆料中加入 PbO 或 CuO 作为助烧剂,以形成足够的液相环境促进晶粒生长,但这些助烧剂会残留在晶粒缝隙中,降低陶瓷致密度。该团队研究了后退火温度对 PMN-PZ-PT 体系织构压电陶瓷的微观结构、介电和压电性能的影响。未经过后退火处理的陶瓷晶界中含有液相氧化铅,经过退火后可以完全消除氧化铅。退火处理对织构陶瓷的相结构和织构度均无任何影响。800 $^\circ\text{C}$ 退火后,陶瓷的压电性能显著提高,室温下 ε_{r} 从 2277 增加到 2410, k_{33} 从 85%提高到 88%, d_{33} 从 1080 pC/N 增加到 1220 pC/N。该结果表明退火工艺能够显著改善织构压电陶瓷的性能。

除了 PMN-PZ-PT,其它三元体系如

表 3 其它三元体系织构压电陶瓷的性能^[40, 48, 57, 59, 86-108]

Table 3 Electric properties of ternary systems except the PMN-PZ-PT textured piezoelectric ceramics^[40, 48, 57, 59, 86-108]

System	Template	$F_{001}/\%$	ε_{33}	Random $d_{33}/(\text{pC}\cdot\text{N}^{-1})$	Textured $d_{33}/(\text{pC}\cdot\text{N}^{-1})$	$T_{\text{m}}/^\circ\text{C}$	$\tan\delta$	Year	Ref.
PIN-0.40PMN-0.32PT	5% BT	93	~2500	416	824	203	~0.025	2015	[86]
PMN-16PYN-0.38PT	5% BT	91	~2000	—	—	214	0.019	2016	[87]
PIN-0.30PMN-0.34PT	5% BT	62	2668	450	560	220	~0.04	2016	[88]
PIN-0.40PMN-0.32PT	5% BT	94	~2500	429	841	~200	—	2016	[48]
CuO-doped PIN-0.4PMN-0.32PT	5% BT	97	~2430	416	927	200	0.013	2017	[89]
PMN-16PYN-0.38PT	5% BT	91	2110	—	—	213	0.022	2017	[90]
PNN-0.15PZ-0.3PT	2% BT	82	~7500	~1020	1210	~103	~0.031	2020	[59]
PYN-0.52PMN-0.32PT	3% BT	~99	~2000	—	—	205	~0.01	2020	[91]
PYN-0.41MN-0.38PT	5% BT	83	~2000	413	409	224	~0.050	2020	[92]
CuO-doped PYN-46PMN-34PT	—	94	1960	380	460	—	0.019	2020	[93]
Mn-doped PIN-0.42PMN-0.34PT	2% BT	84	1514	370	517	205	0.0049	2021	[94]
PIN-0.445PSN-0.365PT	5% BT	99.2	2310	240	1090	247	0.012	2021	[57]
BZZ-0.375BS-0.60PT	5% BT	91	980	216	353	403	0.024	2021	[40]
BMT-0.6PMN-0.3PT	—	90	4500	—	—	—	—	2022	[95]
PSN-0.20PZ-0.41PT	3% BT	~95	1300	265	580	299	0.007	2022	[96]
PNN-0.21PZ-0.37PT	3% BT	96	~3000	730	830	~170	~0.017	2022	[97]
PIN-0.445PSN-0.365PT	2.5% BT	99	2155	—	770	~270	0.0072	2022	[98]
Mn&Cu-doped PIN-0.42PMN-0.34PT	2% BT	97	1498	304	725	205	0.0045	2022	[99]
MnO ₂ -doped PIN-0.46PSN-0.37PT	3% BT	99	1739	181	735	244	0.0039	2023	[100]
MnO ₂ -doped PIN-0.42PMN-0.34PT	2% BT	98	1498	304	725	~205	0.0042	2023	[101]
PIN-0.445PSN-0.365PT	3% BT	—	2100	—	840	261	0.006	2023	[102]
PIN-0.46PMN-0.3PT	5% BT	~99	1960	270	860	195	0.007	2023	[103]
CuO-doped PMN-0.29PIN-0.34PT	3% BT	97	~2000	~450	578	231	—	2023	[104]
PNN-0.25PZ-0.39PT	3% BT	98	2790	443	1165	197	0.021	2023	[105]
PZT-0.11PZN-0.06PNN	10% BZT	63	1123	—	318	230	~0.021	2024	[106]
PNT-0.34PZ-0.42PT	5% BT	98	2499	~250	820	180	—	2024	[107]
Li ₂ CO ₃ -doped PNN-0.16PZ-0.34PT	2% BT	85	3942	943	1180	146	~0.04	2024	[108]

PIN(Pb(In_{1/2}Nb_{1/2})O₃)-PSN(Pb(Sc_{1/2}Nb_{1/2})O₃)-PT、PIN-PMN-PT、PNN(Pb(Ni_{1/3}Nb_{2/3})O₃)-PMN-PT、PYN(Pb(Yb_{1/2}Nb_{1/2})O₃)-PMN-PT 等也被相继报道。表 3 汇总了近年来其它三元体系织构陶瓷的性能^[40, 48, 57, 59, 86-108]。2021 年, Yang 等^[57]针对实际应用需求, 为了提高 $T_{\text{R-T}}$, 在组分中添加较高含量的耐热特性材料 Sc₂O₃, 制备了 PIN-0.445PSN-0.365PT 体系织构压电陶瓷。研究发现, 随着 BT 模板含量的增加, d_{33} 显著提高, 而 $T_{\text{R-T}}$ 与 T_{m} 则略有下降。当 BT 模板体积分数为 5% 时, 该体系的 F_{001} 达到 99.2%, d_{33} 为 1090 pC/N, $T_{\text{R-T}}$ 与 T_{m} 分别为 110 与 247 °C。当模板体积分数为 3% 时, $T_{\text{R-T}}$ 甚至达到了 170 °C, 在三元体系中处于较高水平。此外, 研究还探讨了模板含量与晶粒尺寸之间的关系, 发现当模板体积分数从 3% 增长到 7% 时, 晶粒尺寸从 22 μm 减小至 14 μm, 这与模板的排列密度有关。

经过多年的发展, 铅基织构压电陶瓷在性能上已经取得了显著进步, 一些研究探索了其作为超声换能器、致动器等器件的应用价值。2020 年, Kim 等^[109]采用 BT 模板制备了 PZNN-(Pb[(Zn_{0.4}Ni_{0.6})_{1/3}Nb_{2/3}]O₃)-PZ-PT 三元织构压电陶瓷, 在 4 kV/mm 外电场下获得了 0.33% 的电致应变。随后, 采用 Ag/Pd(80/20) 电极制备了包含 5 层介质的多层共烧织构压电陶瓷, 并设计了一种悬臂梁式致动器。在 50 V 电压下, 该致动器表现出较大的加速度(46.9g)和位移(10.5 mm), 远超非织构压电陶瓷致动器的 32.6g 和 7 mm。2024 年, Zhang 等^[110]基于 PIN-PSN-PT 织构压电陶瓷制备了 1-3 复合材料用于超声换能器。该复合材料具有高机电耦合系数(0.76)、高压电系数(560 pC/N)、低机械品质因数(3.1)和低声阻抗(16.2 Mrayl)等突出特性。该超声波换能器的中心频率为 4.7 MHz, 具有 60%(-6 dB)的带宽和

-34 dB 的双向插入损耗, 其接收灵敏度几乎是商用传感器的 2 倍。最后进行了光声成像试验, 结果证明其在识别缺陷方面具有出色的检测能力。

3.3 目前存在的问题

经过数十年的发展, 铅基织构压电陶瓷的综合压电性能已经取得显著进步, 压电系数、机电耦合系数等参数显著优于非织构多晶陶瓷, T_{R-T} 与 T_m 也满足了大多数应用场景要求, 但依然有一些特性需进一步改善。

1) 模板的尺寸与种类

目前几乎所有的铅基织构压电陶瓷体系都采用片状 BT 作为模板。虽然已有研究的 BT 模板的尺寸较多集中在 5~10 μm (长度、宽度) 和 ~0.5 μm (厚度), 但实际上, 小于 5 μm 和大于 10 μm 的模板依然存在。模板尺寸分布不均可能导致流延过程中模板的排列密度差异, 进而引起晶粒尺寸的显著差异。尺寸较小的模板甚至无法平行排列于生瓷带中, 从而降低晶粒取向程度。此外, BT 模板与不同材料体系的晶格差距较大, 以及 BT 模板与基体材料的 B 位阳离子价态失配, 均会影响织构陶瓷的性能^[11]。探索如何为不同的基体材料设计匹配的模板具有重要的研究价值。重要的是, 根据目前的研究, 织构陶瓷的生长主要依赖于基体材料与模板的尺寸差异导致的表面自由能差, 分子动力学和热力学的微观机理依然有待探索。

2) 织构压电陶瓷的性能

尽管织构压电陶瓷的压电系数和机电耦合系数已经达到较高水平, 但与单晶仍有一定差距, 尤其是在压电系数方面。主要原因在于晶粒的取向程度和模板效应。除了使用 X 射线衍射分析晶粒取向程度外, 还应该探索影响晶粒取向的微观机制, 如晶粒竞争生长、残余应力、孔隙率、模板界面应力等。此外, 目前报道的织构压电陶瓷普遍很薄, 如何生长大块样品以制备较厚的织构陶瓷仍是亟待解决的问题。

3) d_{33} 与 T_m 的竞争关系

压电陶瓷的 d_{33} 与最高 T_m 同时达到较高水平的难度较大。图 7 展示了铅基织构压电陶瓷 d_{33} 与 T_m 的关系, 所有研究成果均位于左下方, 表明 d_{33} 与 T_m 呈负相关关系。这是因为目前增强压电性能的调控机制主要通过提升其弛豫特性实现, 即通过降低极性态的能量使电畴更易翻转, 导致高 d_{33} 只能在较低的 T_m 下获得, T_m 升高时, d_{33} 会下降。所以, 就实际应用来说, 无论含铅还是无铅压电陶瓷, 如何制备出兼具高 d_{33} 与 T_m 的织构压电陶瓷, 是一项重要挑战。

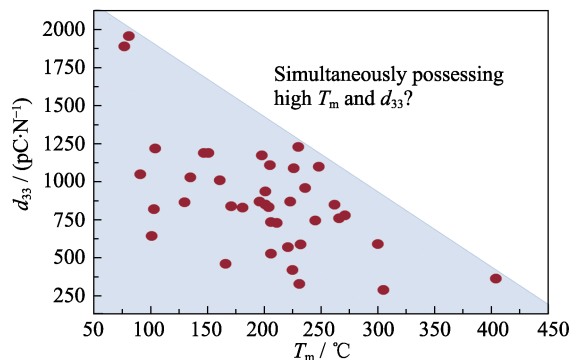


图7 铅基织构压电陶瓷 T_m 与 d_{33} 的关系

Fig. 7 Relationship between T_m and d_{33} in lead-based textured piezoelectric ceramics

4) 织构压电陶瓷的应用

织构压电陶瓷因其高压电系数与机电耦合系数而具备优势, 但在实际应用中, 不同场景对陶瓷性能的要求各不相同。例如, 在谐振状态下, 需要高机械品质因数, 而在极端环境中需要高温稳定性。因此, 织构压电陶瓷的发展应根据具体应用场景去调控相关性能, 以满足不同场景的应用需求。此外, 大规模应用的基础在于成本的合理性, 目前 BT 模板的制备成本较高, 生产工艺繁琐。本课题组的制备流程研究表明, 每克 BT 模板需要消耗的物料成本达到 20~30 元人民币, 因此, 降低成本也是研究重点之一。

4 总结与展望

本文全面介绍了铅基织构压电陶瓷的生长原理和表征方法、模板的制备工艺及织构压电陶瓷制备过程中的关键工艺, 并汇总了当前具有代表性的研究成果, 依据组分数量将其分为二元与三元体系。

总的来看, 经过多年发展, 铅基织构压电陶瓷的性能已取得显著进展。织构压电陶瓷的晶粒取向生长带来的各向异性赋予其优异的性能, 与非织构压电陶瓷相比, 其压电系数与机电耦合系数显著提高, 表现出巨大的应用潜力。铅基织构压电陶瓷的突破性进展将助力航空航天、工业设备和电子器件等领域快速发展。

在未来发展方向上, 为了提升铅基织构压电陶瓷的性能, 加速其产业化进程, 需要优先解决模板与基体材料的匹配性问题, 主要体现在晶格参数和 B 位离子价态的差异上。为了改善匹配性, 可以结合理论计算, 预测基体材料的晶格参数, 并对模板材料进行针对性的元素掺杂, 使其晶格参数与基体材料的晶格参数相近, 同时也可选用与基体材料 B

位离子价态相近的掺杂元素。

此外,当前报道的铅基织构压电陶瓷内部孔洞较多,严重影响了陶瓷的机械性能并对压电系数产生负面影响。对此,可以从流延工艺入手,探索合适的流延浆料配方与工艺参数。铅基织构压电陶瓷晶粒定向生长的微观机理同样至关重要。可以对不同时间烧结的样品进行微观检测,以揭示基体材料与模板在晶格尺度上的影响规律。相信经过研究者的不断努力,铅基织构压电陶瓷一定能够实现大规模应用。

参考文献:

- [1] COLLINS E, PANTOYA M, NEUBER A A, *et al.* Piezoelectric ignition of nanocomposite energetic materials. *Journal of Propulsion and Power*, 2014, **30**(1): 15.
- [2] ZHOU T, WANG S, BAO D, *et al.* Correlation and comprehensive selection of the piezoelectric ignition material parameters. *Ferroelectrics*, 1997, **195**(1): 97.
- [3] WAN X, CONG H, JIANG G, *et al.* A review on PVDF nanofibers in textiles for flexible piezoelectric sensors. *ACS Applied Nano Materials*, 2023, **6**(3): 1522.
- [4] LU B, XIE L, LEI H, *et al.* Research progress in self-powered pressure sensors for Internet of healthcare. *Advanced Materials Technologies*, 2024, **9**(21): 2301480.
- [5] ZHI C, SHI S, SI Y, *et al.* Recent progress of wearable piezoelectric pressure sensors based on nanofibers, yarns, and their fabrics via electrospinning. *Advanced Materials Technologies*, 2022, **8**(5): 2201161.
- [6] MESHKINZAR A, AL-JUMAILY A M. Cylindrical piezoelectric PZT transducers for sensing and actuation. *Sensors*, 2023, **23**(6): 3042.
- [7] PYUN J Y, KIM Y H, PARK K K. Design of piezoelectric acoustic transducers for underwater applications. *Sensors*, 2023, **23**(4): 1821.
- [8] JIN H, GAO X, REN K, *et al.* Review on piezoelectric actuators based on high-performance piezoelectric materials. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2022, **69**(11): 3057.
- [9] LIU J, GAO X, JIN H, *et al.* Miniaturized electromechanical devices with multi-vibration modes achieved by orderly stacked structure with piezoelectric strain units. *Nature Communications*, 2022, **13**: 6567.
- [10] GAO X, YANG J, WU J, *et al.* Piezoelectric actuators and motors: materials, designs, and applications. *Advanced Materials Technologies*, 2019, **5**: 1900716.
- [11] ZHOU X, WU S, WANG X, *et al.* Review on piezoelectric actuators: materials, classifications, applications, and recent trends. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2024, **19**(1): 6.
- [12] YU Y, CHENG Z, CHANG J, *et al.* Enhanced in-plane omnidirectional energy harvesting from extremely weak magnetic fields via fourfold symmetric magneto-mechano-electric coupling. *Advanced Energy Materials*, 2024, **14**(43): 2402487.
- [13] YU Z, YANG J, XU L, *et al.* Giant tridimensional power responses in a T-shaped magneto-mechano-electric energy harvester. *Energy & Environmental Science*, 2024, **17**(4): 1426.
- [14] YU Z, YANG J, CAO J, *et al.* A PMNN-PZT piezoceramic based magneto-mechano-electric coupled energy harvester. *Advanced Functional Materials*, 2022, **32**(25): 2111140.
- [15] YU Z, LI Z, YUAN X, *et al.* Enhanced extremely weak-field energy harvesting via magnetic flux and stress concentration effects in ferromagnetic/ferroelectric composite. *Applied Physics Letters*, 2022, **121**(7): 072902.
- [16] YUAN X, GAO X, YANG J, *et al.* The large piezoelectricity and high power density of a 3D-printed multilayer copolymer in a rugby ball-structured mechanical energy harvester. *Energy & Environmental Science*, 2020, **13**(1): 152.
- [17] ZHU R, CHENG Z, LV X, *et al.* Piezo-turned magnet rotation for ELF/SLF cross-medium communication in omni-direction. *Advanced Optical Materials*, 2024, **12**(20): 2400461.
- [18] CHENG Z, ZHOU J, WANG B, *et al.* A bionic flapping magnetic-dipole resonator for ELF cross-medium communication. *Advanced Science*, 2024, **11**(30): 2403746.
- [19] 智研瞻产业研究院. 中国压电材料行业报告: 概述、行业企业布局、产业链、应用机遇及发展前景分析. (2024-07-04) [2024-12-16]. https://roll.sohu.com/a/790593871_120815556.
- [20] WANG J, QIN X, LIU Z, *et al.* Development and performance analysis of hemispherical piezoelectric transducer for road applications. *Ferroelectrics*, 2021, **584**(1): 70.
- [21] ZHENG X, HE L, WANG S, *et al.* A review of piezoelectric energy harvesters for harvesting wind energy. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2023, **352**: 114190.
- [22] HE L, HAN Y, SUN L, *et al.* A rotating piezoelectric-electromagnetic hybrid harvester for water flow energy. *Energy Conversion and Management*, 2023, **290**: 117221.
- [23] ZHANG L, SUN D, CHAI M, *et al.* Ultrafast photoinduced strain in super-tetragonal PbTiO₃ ferroelectric films. *Science China Materials*, 2021, **64**(7): 1679.
- [24] SHI X, HE J. Thermopower and harvesting heat. *Science*, 2021, **371**(6527): 343.
- [25] YANG Q Y, YANG S Q, QIU P F, *et al.* Flexible thermoelectrics based on ductile semiconductors. *Science*, 2022, **377**(6608): 854.
- [26] PARK S E, SHROUT T R. Ultrahigh strain and piezoelectric behavior in relaxor based ferroelectric single crystals. *Journal of Applied Physics*, 1997, **82**(4): 1804.
- [27] SERVICE R F. Shape-changing crystals get shifter. *Science*, 1997, **275**(5308): 1878.
- [28] SUN Y, CHANG Y, WU J, *et al.* Ultrahigh energy harvesting properties in textured lead-free piezoelectric composites. *Journal of Materials Chemistry A*, 2019, **7**(8): 3603.
- [29] YANG Z, ZHOU S, ZU J, *et al.* High-performance piezoelectric energy harvesters and their applications. *Joule*, 2018, **2**(4): 642.
- [30] WU J, ZHANG S, LI F. Prospect of texture engineered ferroelectric ceramics. *Applied Physics Letters*, 2022, **121**(12): 120501.
- [31] LE FERRAND H. Magnetic slip casting for dense and textured ceramics: a review of current achievements and issues. *Journal of the European Ceramic Society*, 2021, **41**(1): 24.
- [32] WANG M, FAN L, WANG S, *et al.* Fabrication of textured cerium-doped lutetium oxyorthosilicate ceramics by slip casting in a strong magnetic field. *Journal of the American Ceramic Society*, 2022, **105**(8): 5102.
- [33] LI R Z, WANG X G, YUAN J H, *et al.* Enhanced high-temperature strength in textured (Ti_{1/3}Zr_{1/3}Hf_{1/3})B₂ medium-entropy ceramics via strong magnetic field. *Journal of the American Ceramic Society*, 2023, **106**(9): 5440.
- [34] SONG Y, LIU P, WU W, *et al.* High-performance colossal permittivity for textured (Al+Nb) co-doped TiO₂ ceramics sintered in nitrogen atmosphere. *Journal of the European Ceramic Society*, 2021, **41**(7): 4146.
- [35] SHI Y, HE Q, WANG A, *et al.* Effect of additive content on texture evolution and mechanical properties of Si₃N₄ ceramics prepared by hot pressing. *Materials Science and Engineering: A*, 2024, **898**: 146348.
- [36] LI J, JIANG Q, PAN Z, *et al.* Fabrication of silicon nitride with high thermal conductivity and flexural strength by hot-pressing flowing sintering. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 2024, **21**(4): 2841.

- [37] FU Z, WEI Y, LIU Y, *et al.* Polycrystalline thermosensitive ceramic oxides in CaCeNbWO_8 : density, texture, and thermal aging stability. *Journal of the American Ceramic Society*, 2021, **105**(4): 2442.
- [38] ZHANG Z, DUAN X, TIAN Z, *et al.* Texture and anisotropy of hot-pressed h-BN matrix composite ceramics with *in situ* formed YAG. *Journal of Advanced Ceramics*, 2022, **11**(4): 532.
- [39] WALTON R L, KUPP E R, MESSING G L. Additive manufacturing of textured ceramics: a review. *Journal of Materials Research*, 2021, **36**(18): 3591.
- [40] AKÇA E, DURAN C, KOWALSKI B, *et al.* Templated grain growth of $\text{Bi}(\text{Zn}_{0.5}\text{Zr}_{0.5})\text{O}_3$ modified BiScO_3 - PbTiO_3 piezoelectric ceramics for high temperature applications. *Journal of Asian Ceramic Societies*, 2021, **9**(3): 874.
- [41] ZHANG L, LIN J, LI G, *et al.* Dual-template textured BNT-based ceramics with ultra-low electrostrain hysteresis. *Journal of the European Ceramic Society*, 2024, **44**(13): 7597.
- [42] LI X, YAO M, LIN W, *et al.* Morphological evolution of plate-like B-site complex perovskite $\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$ microcrystals. *Journal of Solid State Chemistry*, 2023, **326**: 124236.
- [43] PENG J, LIU W, ZENG J, *et al.* Large electromechanical strain at high temperatures of novel $\langle 001 \rangle$ textured BiFeGaO_3 - BaTiO_3 based ceramics. *Journal of Materials Science & Technology*, 2020, **48**: 92.
- [44] LIU Y, ZHANG H, MA C, *et al.* Fine grained textured BaTiO_3 -based piezoelectric ceramics with outstanding strain properties for the lead-free multilayer actuator. *Ceramics International*, 2024, **50**(14): 26018.
- [45] LAI L X, ZHAO Z H, TIAN S, *et al.* Ultrahigh electrostrain with excellent fatigue resistance in textured Nb^{5+} -doped $(\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5})\text{TiO}_3$ -based piezoceramics. *Journal of Advanced Ceramics*, 2023, **12**(3): 487.
- [46] TATO M, SHIRNONISHI R, HAGIWARA M, *et al.* Reactive templated grain growth and thermoelectric power factor enhancement of textured CuFeO_2 ceramics. *ACS Applied Energy Materials*, 2020, **3**(2): 1979.
- [47] WU Q, ZHANG F Q, WANG B, *et al.* A lead-free KNN-based, co-fired multilayered piezoceramic energy harvester with a high output current and power. *Journal of Materiomics*, 2025, **11**(2): 100876.
- [48] CHANG Y, SUN Y, WU J, *et al.* Formation mechanism of highly $[001]_c$ textured $\text{Pb}(\text{In}_{1/2}\text{Nb}_{1/2})\text{O}_3$ - $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ - PbTiO_3 relaxor ferroelectric ceramics with giant piezoelectricity. *Journal of the European Ceramic Society*, 2016, **36**(8): 1973.
- [49] LOTGERING F K. Topotactical reactions with ferrimagnetic oxides having hexagonal crystal structures—II. *Journal of Inorganic & Nuclear Chemistry*, 1960, **16**(1/2): 100.
- [50] LI L, DENG J, CHEN J, *et al.* Topochemical molten salt synthesis for functional perovskite compounds. *Chemical Science*, 2016, **7**(2): 855.
- [51] WU Q, ZHAO L, CHEN X, *et al.* Efficiently enhanced energy storage performance of $\text{Ba}_2\text{Bi}_4\text{Ti}_5\text{O}_{18}$ film by co-doping Fe^{3+} and Ta^{5+} ion with larger radius. *Chinese Physics B*, 2022, **31**(9): 097701.
- [52] WU Q, WU X, ZHAO Y S, *et al.* Design of lead-free films with high energy storage performance *via* inserting a single perovskite into $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$. *Chinese Physics Letters*, 2020, **37**(11): 118401.
- [53] WU Q, CHEN X, ZHAO L, *et al.* The relaxor properties and energy storage performance of Aurivillius compounds with different number of perovskite-like layers. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, **911**: 165081.
- [54] WU Q, ZHAO Y, ZHOU Y, *et al.* Energy storage properties of composite films with relaxor antiferroelectric behaviors. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, **881**: 160576.
- [55] LI J L, QU W B, DANIELS J, *et al.* Lead zirconate titanate ceramics with aligned crystallite grains. *Science*, 2023, **380**(6640): 87.
- [56] PAN M J, RANDALL C A. A brief introduction to ceramic capacitors. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 2010, **26**(3): 44.
- [57] YANG S, LI J, LIU Y, *et al.* Textured ferroelectric ceramics with high electromechanical coupling factors over a broad temperature range. *Nature Communications*, 2021, **12**: 1414.
- [58] TOK A I Y, BOEY F Y C, LAM Y C. Non-newtonian fluid flow model for ceramic tape casting. *Materials Science and Engineering: A*, 2000, **280**(2): 282.
- [59] BIAN L, QI X, LI K, *et al.* High-performance $[001]_c$ -textured PNN-PZT relaxor ferroelectric ceramics for electromechanical coupling devices. *Advanced Functional Materials*, 2020, **30**(25): 2001846.
- [60] WU Y, SOON P S, LU J T, *et al.* Life cycle assessment of lead-free potassium sodium niobate *versus* lead zirconate titanate: energy and environmental impacts. *EcoMat*, 2024, **6**(5): e12450.
- [61] KUWATA J, UCHINO K, NOMURA S. Dielectric and piezoelectric properties of $0.91\text{Pb}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ - 0.09PbTiO_3 single crystals. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1982, **21**(9): 1298.
- [62] ZHANG Y, XUE D, WU H, *et al.* Adaptive ferroelectric state at morphotropic phase boundary: coexisting tetragonal and rhombohedral phases. *Acta Materialia*, 2014, **71**: 176.
- [63] POTERALA S F, TROLIER-MCKINSTRY S, MEYER R J, *et al.* Processing, texture quality, and piezoelectric properties of $\langle 001 \rangle_c$ textured $(1-x)\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{TiO}_3$ - $x\text{PbTiO}_3$ ceramics. *Journal of Applied Physics*, 2011, **110**: 014105.
- [64] YAN Y, WANG Y U, PRIYA S. Electromechanical behavior of $[001]_c$ -textured $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ - PbTiO_3 ceramics. *Applied Physics Letters*, 2012, **100**(19): 192905.
- [65] BERKSOY-YAVUZ A, MENSUR-ALKOY E. Enhanced soft character of crystallographically textured Mn-doped binary $0.675[\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3]$ - $0.325[\text{PbTiO}_3]$ ceramics. *Journal of Electronic Materials*, 2018, **47**(11): 6557.
- [66] JIA H, YANG S, ZHU W, *et al.* Improved piezoelectric properties of $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ - PbTiO_3 textured ferroelectric ceramics *via* Sm-doping method. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, **881**: 160666.
- [67] YANG S, WANG M, WANG L, *et al.* Achieving both high electromechanical properties and temperature stability in textured PMN-PT ceramics. *Journal of the American Ceramic Society*, 2021, **105**(5): 3322.
- [68] ZHENG K, QUAN Y, ZHUANG J, *et al.* Achieving high piezoelectric performances with enhanced domain-wall contributions in $\langle 001 \rangle$ -textured Sm-modified PMN-29PT ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*, 2021, **41**(4): 24584.
- [69] MORIANA A D, ZHANG S J. Determining the effects of BaTiO_3 template alignment on template grain growth of $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ - PbTiO_3 and effects on piezoelectric properties. *Journal of the European Ceramic Society*, 2022, **42**(6): 2752.
- [70] YAN Y, GENG L D, ZHU L F, *et al.* Ultrahigh piezoelectric performance through synergistic compositional and microstructural engineering. *Advanced Science*, 2022, **9**(14): 2105715.
- [71] TANG M, LIU X, WANG Y, *et al.* High piezoelectric response in $[001]_c$ textured Sm^{3+} doped $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ - PbTiO_3 ceramics. *Journal of Applied Physics*, 2023, **133**(18): 184102.
- [72] WANG Q, YAO M, LIN W, *et al.* Microstructure and electrical properties of Er-doped $0.67\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ - 0.33PbTiO_3 ceramics with BaTiO_3 templates. *Ceramics International*, 2023, **49**(1): 437.
- [73] LI F, CABRAL M J, XU B, *et al.* Giant piezoelectricity of Sm-doped $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ - PbTiO_3 single crystals. *Science*, 2019, **364**(6437): 264.
- [74] PAN H, LAN S, XU S Q, *et al.* Ultrahigh energy storage in superparaelectric relaxor ferroelectrics. *Science*, 2021, **374**(6563): 100.
- [75] ZHANG S, LI F. High performance ferroelectric relaxor- PbTiO_3 single crystals: status and perspective. *Journal of Applied Physics*, 2012, **111**(3): 031301.

- [76] YAN Y, CHO K H, PRIYA S. Piezoelectric properties and temperature stability of Mn-doped $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-PbZrO}_3\text{-PbTiO}_3$ textured ceramics. *Applied Physics Letters*, 2012, **100**(13): 132908.
- [77] YAN Y, CHO K H, MAURYA D, *et al.* Giant energy density in [001]-textured $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-PbZrO}_3\text{-PbTiO}_3$ piezoelectric ceramics. *Applied Physics Letters*, 2013, **102**(4): 042903.
- [78] ZATE T T, KIM M, JEON J H. Outstanding unipolar strain of textured $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-PbZrO}_3\text{-PbTiO}_3$ piezoelectric ceramics manufactured by particle size distribution control of the plate-like BaTiO_3 template. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2022, **335**: 113373.
- [79] LIU L, YANG B, YANG S, *et al.* Cu-modified $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-PbZrO}_3\text{-PbTiO}_3$ textured ceramics with enhanced electromechanical properties and improved thermal stability. *Journal of the European Ceramic Society*, 2022, **42**(6): 2743.
- [80] KIM E J, KIM S W, KIM D S, *et al.* Piezoelectric properties of [001]-textured high-power PMN-PZT piezoceramics sintered at a low temperature. *Journal of the European Ceramic Society*, 2023, **43**(5): 1912.
- [81] YAN Y, GENG L D, LIU H, *et al.* Near-ideal electromechanical coupling in textured piezoelectric ceramics. *Nature Communications*, 2022, **13**: 3565.
- [82] DURSUN S, MENSUR-ALKOY E, UNVER M U, *et al.* Enhancement of electrical properties in the ternary PMN-PT-PZ through compositional variation, crystallographic texture, and quenching. *Journal of the American Ceramic Society*, 2019, **103**(4): 24998.
- [83] LIU L, YANG B, LV R, *et al.* Enhanced unipolar electrical fatigue resistance and related mechanism in grain-oriented $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$ piezoceramics. *Journal of Materials Science & Technology*, 2023, **145**: 40.
- [84] TANG M, HU L, WU Y, *et al.* Electromechanical properties of [001]-textured Mn-PMN-PZT ceramics under hydrostatic pressure. *Journal of the American Ceramic Society*, 2023, **107**(2): 1042.
- [85] ZHANG Y, TANG M, WANG Y, *et al.* Effect of post-annealing on the electrical properties of textured $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-PbZrO}_3\text{-PbTiO}_3$ piezoelectric ceramics. *Ceramics International*, 2024, **50**(11): 18814.
- [86] CHANG Y, WU J, SUN Y, *et al.* Enhanced electromechanical properties and phase transition temperatures in [001] textured $\text{Pb}(\text{In}_{1/2}\text{Nb}_{1/2})\text{O}_3\text{-Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-PbTiO}_3$ ternary ceramics. *Applied Physics Letters*, 2015, **107**(8): 082902.
- [87] DURAN C, DURSUN S, AKÇA E. High strain, <001>-textured $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-Pb}(\text{Yb}_{1/2}\text{Nb}_{1/2})\text{O}_3\text{-PbTiO}_3$ piezoelectric ceramics. *Scripta Materialia*, 2016, **113**: 14.
- [88] WEI D, WANG H. Low-temperature sintering and enhanced piezoelectric properties of random and textured PIN-PMN-PT ceramics with Li_2CO_3 . *Journal of the American Ceramic Society*, 2016, **100**(3): 1073.
- [89] CHANG Y, WATSON B, FANTON M, *et al.* Enhanced texture evolution and piezoelectric properties in CuO-doped $\text{Pb}(\text{In}_{1/2}\text{Nb}_{1/2})\text{O}_3\text{-Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-PbTiO}_3$ grain-oriented ceramics. *Applied Physics Letters*, 2017, **111**(23): 232901.
- [90] DURAN C, CENGİZ S, ECEBAŞ N, *et al.* Processing and characterization of <001>-textured $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-Pb}(\text{Yb}_{1/2}\text{Nb}_{1/2})\text{O}_3\text{-PbTiO}_3$ ceramics. *Journal of Materials Research*, 2017, **32**(13): 2471.
- [91] CHANG Y, WU J, LIU Z, *et al.* Grain-oriented ferroelectric ceramics with single-crystal-like piezoelectric properties and low texture temperature. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, **12**(34): 38415.
- [92] BROVA M J, WATSON B H, WALTON R L, *et al.* Templated grain growth of high coercive field CuO-doped textured PYN-PMN-PT ceramics. *Journal of the American Ceramic Society*, 2020, **103**(11): 6149.
- [93] BROVA M J, WATSON B H, WALTON R L, *et al.* Relationship between composition and electromechanical properties of CuO-doped textured PYN-PMN-PT ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*, 2021, **41**(2): 1230.
- [94] LENG H, YAN Y, LIU H, *et al.* Design and development of high-power piezoelectric ceramics through integration of crystallographic texturing and acceptor-doping. *Acta Materialia*, 2021, **206**: 116610.
- [95] JIA H, LIANG Z, LI Z, *et al.* Texture technique to simultaneously achieve large electric field induced strain response and ultralow hysteresis in BMT-PMN-PT relaxor ferroelectric ceramics. *Scripta Materialia*, 2022, **209**: 114409.
- [96] MORIANA A D, ZHANG S. Enhancing electromechanical properties of $\text{Pb}(\text{Sc}_{1/2}\text{Nb}_{1/2})\text{O}_3\text{-PbZrO}_3\text{-PbTiO}_3$ piezoelectric ceramics via templated grain growth. *Advanced Electronic Materials*, 2021, **8**(6): 2100919.
- [97] BIAN L, KOU Q, LIU L, *et al.* Enhancing the temperature stability of 0.42PNN-0.21PZ-0.37PT ceramics through texture engineering. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, **14**(2): 3076.
- [98] YANG S, QIAO L, WANG J, *et al.* Full matrix electromechanical properties of textured $\text{Pb}(\text{In}_{1/2}\text{Nb}_{1/2})\text{O}_3\text{-Pb}(\text{Sc}_{1/2}\text{Nb}_{1/2})\text{O}_3\text{-PbTiO}_3$ ceramic. *Journal of Applied Physics*, 2022, **131**(12): 124104.
- [99] LENG H, YAN Y, WANG B, *et al.* High performance high-power textured Mn/Cu-doped PIN-PMN-PT ceramics. *Acta Materialia*, 2022, **234**: 118015.
- [100] LENG H, WANG Y U, YAN Y, *et al.* Water quenched and acceptor-doped textured piezoelectric ceramics for off-resonance and on-resonance devices. *Small*, 2022, **19**(1): 2204454.
- [101] LENG H, YAN Y, LI X, *et al.* High-power piezoelectric behavior of acceptor-doped <001> and <111> textured piezoelectric ceramics. *Journal of Materials Chemistry C*, 2023, **11**(6): 2229.
- [102] YANG S, TIAN F, LI C, *et al.* Electromechanical properties of textured PIN-PSN-PT ceramics under uniaxial stress, hydrostatic pressure, and bias electric field. *Journal of Applied Physics*, 2023, **133**(9): 094104.
- [103] YANG S, ZHANG J, QIU C, *et al.* Investigation on the planar Poisson's ratio of <001>-oriented $\text{Pb}(\text{In}_{1/2}\text{Nb}_{1/2})\text{O}_3\text{-Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-PbTiO}_3$ ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*, 2024, **44**(5): 3058.
- [104] ZATE T T, KO N R, YU H L, *et al.* Textured $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-Pb}(\text{In}_{1/2}\text{Nb}_{1/2})\text{O}_3\text{-PbTiO}_3$ ceramics with enhanced piezoelectric properties and high Curie temperature prepared by low-temperature sintering. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2024, **366**: 114929.
- [105] WANG Q, BIAN L, LI K, *et al.* Achieving ultrahigh electromechanical properties with high T_c in PNN-PZT textured ceramics. *Journal of Materials Science & Technology*, 2024, **175**: 258.
- [106] FENG X, LI L, XU X, *et al.* Microstructure evolution and properties of textured $\text{Pb}(\text{Zr}_{1/2}\text{Ti}_{1/2})\text{O}_3\text{-Pb}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-Pb}(\text{Ni}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ ceramics with plate-like $\text{BaZr}_{0.1}\text{Ti}_{0.9}\text{O}_3$ template. *Journal of Alloys and Compounds*, 2024, **1002**: 175439.
- [107] BIAN L, WANG Q, HE S, *et al.* Excellent strain and temperature stability in PNT-PZT multilayer textured ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*, 2024, **44**(8): 5048.
- [108] CHO S W, NA Y H, BAIK J M, *et al.* Low-temperature sintered 0.5Pb($\text{Ni}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}$) O_3 -0.16PbZrO $_3$ -0.34PbTiO $_3$ piezoelectric textured ceramics by Li_2CO_3 addition. *Journal of the American Ceramic Society*, 2024, **107**(6): 4178.
- [109] KIM E J, LEE T G, KIM D S, *et al.* Textured $\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3\text{-Pb}[(\text{Zn,Ni})_{1/3}\text{Nb}_{2/3}]\text{O}_3$ multilayer ceramics and their application to piezoelectric actuators. *Applied Materials Today*, 2020, **20**: 100695.
- [110] ZHANG Z, WANG Z, YANG S, *et al.* Textured ferroelectric ceramics based 1-3 piezoelectric composite for photoacoustic imaging. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2024, **380**: 116030.
- [111] HAO M, FAN G, CAI W, *et al.* Texture tolerance to B-site valence mismatch for [001] textured $\text{Pb}_{97.5}\text{Ba}_{2.5}[(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})_{1-x}\text{Ti}_x]\text{O}_3$ transparent ceramics. *Ceramics International*, 2021, **47**(1): 1253.