

基于 BGSPT 压电陶瓷的高温加速度传感器

石 维¹, 朱建国², 肖定全², 王 强¹, 欧永康¹

(1. 铜仁学院 物理与电子科学系, 贵州 铜仁 554300; 2. 四川大学 材料科学与工程学院, 四川 成都 610064)

摘 要: 研究了一种基于 $0.02\text{BiGaO}_3-0.32\text{BiScO}_3-0.66\text{PbTiO}_3$ (BGSPT66) 压电陶瓷的高温加速度传感器。采用传统固相法制备了 BGSPT66 的压电陶瓷, 其压电系数 (d_{33}) 约为 320 pC/N , 居里温度 (T_c) 约为 465°C ; 设计了以 BGSPT 陶瓷作为压电振子的垂压式加速度传感器, 进行了灵敏度与温度稳定性依赖关系测试。实验表明, BGSPT 加速度传感器在 $20\sim 200^\circ\text{C}$ 具有稳定的输出信号, 相对灵敏度 (S) 约为 $18 \text{ mV} \cdot \text{s}^2/\text{mm}$, 并有较好的低频稳定性。这种压电加速度传感器体积小, 灵敏度高及温度稳定性好, 有望在石油勘探和航空航天等相关领域获得应用。

关键词: 压电陶瓷; 高居里温度; 加速度传感器; 灵敏度; 稳定性

中图分类号: TP212

文献标识码: A

A High Temperature Piezoelectric Accelerator Based on BGSPT Ceramics

SHI Wei¹, ZHU Jianguo², XIAO Dingquan², WANG Qiang¹, OU Yongkang¹

(1. Dept. of Physics and Electronic Science, College of Tongren, Tongren 554300, China;

2. College of Materials Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

Abstract: A kind of high temperature piezoelectric accelerator based on $0.02\text{BiGaO}_3-0.32\text{BiScO}_3-0.66\text{PbTiO}_3$ (BGSPT66) ceramics is investigated. The BGSPT66 piezoelectric ceramics prepared by the conventional solid phase processing has the piezoelectric constant (d_{33}) of 320 pC/N and Curie temperature (T_c) of about 465°C . A vertical pressure piezoelectric accelerator has been designed by using BGSPT ceramics as the piezoelectric vibrator and the dependence of the sensitivity on the temperature stability has been tested. The experimental results show that the BGSPT piezoelectric accelerator has stable output signals at $20\sim 200^\circ\text{C}$, the relative sensitivity (S) of about $18 \text{ mV} \cdot \text{s}^2/\text{mm}$ and good low frequency stability. This piezoelectric accelerator has the features of small size, high sensitivity and good temperature stability and is hopeful of applications to the oil exploration and the aerospace fields.

Key words: piezoelectric ceramics; high Curie temperature; accelerator; sensitivity; stability

0 引言

压电加速度传感器是利用压电陶瓷材料的正压效应和逆压电效应的原理来测定精密的低频振动和加速度的环境信息^[1], 被广泛应用于建筑桥梁、航空航天、汽车工业和地质勘探等领域。在各项参数中, 电子元器件的温度稳定性是一项重要的性能指标。通常民用电子产品的使用温度在 75°C 以下, 而一些军工电子产品可在 125°C 附近应用^[2]。随着技术应用领域的拓展, 特别是在地质勘探、航空航天和汽车工业等某些应用环境中, 电子元器件需适应更高的工作环境温度 ($T > 200^\circ\text{C}$), 而解决该问题的关键

是高居里温度 (T_c) 的压电材料的应用。目前锆钛酸铅陶瓷 (PZT) 以其优越的压电性能 (压电常数 $d_{33} \approx 450 \text{ pC/N}$) 在压电式传感器中广泛应用, 但其 T_c 不高 ($T_c < 360^\circ\text{C}$), 限制了更高环境的应用 ($T < 120^\circ\text{C}$)^[3-4]。2001 年, 美国宾夕法尼亚州立大学的 Eitel 等^[5] 采用合成了具有高 T_c 的钙钛矿结构压电陶瓷 $\text{BiScO}_3\text{-PbTiO}_3$ (BSPT), 特别是在该体系准同型相界面处 ($x = 0.64$) 具有优良的电学性能和较高的 T_c ($d_{33} \approx 460 \text{ pC/N}$, $T_c \approx 450^\circ\text{C}$)。这一研究显示钙钛矿结构的压电陶瓷兼具更高 T_c 和高性能的可能, 并很快成为研究的热点。2008 年, 江一

收稿日期: 2012-09-12

基金项目: 贵州省科技厅基金资助项目 (黔科合 [2011(2031)]) ; 贵州省教育厅重点实验室基金资助项目 (2012); 铜仁学院博士启动基金资助项目 (DS1001)

作者简介: 石维 (1975-), 男 (苗族), 贵州铜仁人, 副教授, 博士, 主要从事电子材料及元件的研究。E-mail: wlxsx@sina.cn.

杭和赵毅等^[6-7]合成了具有高温、高性能的 $\text{BiScO}_3\text{-BiGaO}_3\text{-PbTiO}_3$ (BGSPT) 压电陶瓷, 报道了其优越的压电性能和较高的 T_c ($T_c \approx 490^\circ\text{C}$, $d_{33} \approx 180\text{ pC/N}$), 通过 Ga 替换 B 位 Sc 离子提高了 BGSPT 压电陶瓷的 T_c 。但 BGSPT 压电陶瓷在传感器技术中的应用报道较少。我们的研究采用传统固相法制备了 BGSPT66 陶瓷, 设计了垂压式压电加速度传感器, 通过升温环境和振动环境的测试, 研究了该加速度传感器的灵敏度和频率特性等相关电学性能。

1 材料制备

1.1 压电式加速度传感器高温失效原理

引起压电加速度传感器失效的其中一个最重要的因素是压电陶瓷在一定的温度环境中压电性能减弱甚至消失, 压电陶瓷的正、逆压电性能来自于陶瓷内部的自发极化^[8-9], 形成一端为正, 一端为负的电偶极矩, 从而产生压电性能。压电陶瓷的压电性能只存在于某一特定的温度范围, 当环境温度达到或超过该温度范围时, 压电陶瓷的铁电相向顺电相转变导致自发极化消失, 相变温度又称为 T_c 。根据铁电相变的热力学理论, 在相变温度 T_c 、压电材料的电容率出现反常, 当 $T > T_c$ 时, 介电常数与温度间的关系可由居里-外斯定律来表示^[10]:

$$\epsilon_r(T) = C / (T - T_0) \quad (T > T_0) \quad (1)$$

式中: C 为居里-外斯常数; T 为环境温度; T_0 为压电陶瓷的居里-外斯温度; ϵ_r 为陶瓷的介电常数。二级相变 $T = T_c$ 。 ϵ_r 逐渐随环境温度升高而升高, 当 T 超过陶瓷材料的 T_c 时, 自发极化逐渐减弱, ϵ_r 开始出现下降趋势, 此时 ϵ_r 峰值点对应陶瓷的 T_c 。通常陶瓷的 ϵ_r 在超过 T_c 的一半以上波动增大, 这时的加速传感器信号输出失真, 并伴随环境温度持续升高最终使压电电子元件失效。

1.2 BGSPT 压电陶瓷的制备及其性能参数

采用传统固相反应法制备 BGSPT x ($x = 0.66$) 陶瓷粉料。经过 850°C 预烧后加入聚乙烯醇 (PVA) 造粒, 使用环状模具进行压制得到带孔状的坯片, 在 1100°C 条件下烧结 2 h 成型。对烧结后 BGSPT 陶瓷片进行抛光打磨, 超声清洗后上银电极, 在 710°C 烧银得到成品。然后对成品陶瓷进行极化, 极化电压为 4000 V , 极化时间为 20 min, 最后进行相结构和电学性能等参数测试。BGSPT66 压电陶瓷的相关参数如表 1 所示, 并与典型的 PZT-

5H 型压电陶瓷 (南通奥新电子有限公司) 的相关参数进行了对比。表 1 中 BGSPT66 的压电性能与商用压电陶瓷 PZH-5H 相近, 但 T_c 高出 100°C , 使其比商用 PZH 系列压电陶瓷更能适应更宽的温度范围。

表 1 BGSPT66 陶瓷与 PZT-5H 的电学参数对比

样品	相结构	$T_c / ^\circ\text{C}$	$\tan \delta / \%$	$d_{33} / (\text{pC/N})$	k_p
BGSPT66	T(四方)	465	2.5	320	0.43
PZT-5H	T(四方)	365	1.3	360	0.56

为了研究 BGSPT66 压电陶瓷的温度稳定性, 实验对 BGSPT66 陶瓷进行了退火处理。将 BGSPT66 陶瓷的样品片置入烧结炉中采用不断升高的温度段进行退火, 退火的保温时间为 30 min, 退火后在室温条件老化 24 h 后测试样品的 d_{33} 。图 1 为 BGSPT 陶瓷在不同温度退极化后的 d_{33} 。由图可知, BGSPT66 陶瓷的 d_{33} 随着退火温度的升高而降低。当 $T \geq 250^\circ\text{C}$ 后, BGSPT66 陶瓷的压电性能快速下降, 直至其压电性能完全消失, 该过程与居里-外斯定律相符。

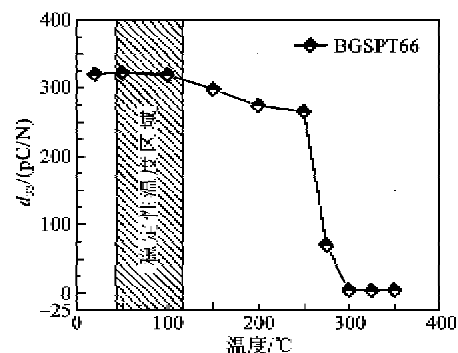


图 1 BGSPT 陶瓷在不同温度退极化后的 d_{33}

2 压缩型加速度传感器的设计

压缩型加速度传感器结构简单, 灵敏度高, 输出信号稳定, 易于设计和加工, 故采用该加速度传感器模型^[10]。图 2 为压缩型加速度传感器的结构示意图, 图 3 为装配后的实物图。其主要构成为预紧螺母、电极片、内嵌信号线、BGSPT 压电陶瓷片、惯性质量块和壳体等。压电加速度传感器在规定的频率范围内, 振动物体 (此处为质量块) 近似遵守牛顿第二定律: $F = ma$, 其中 m 为质量块质量, a 为传感器附着在被测物体上的加速度, 也可看作是传感器的加速度, F 为质量块施加在压电片上的惯性力。压电片两极积累电荷的总量 Q 和施加的力成正比, 而施

加的力和 a 成正比,如果设压电陶瓷的二阶压电张量为 d_{ij} ,该传感器输出电荷灵敏度为^[11]

$$S = \frac{Q}{a} = \frac{d_{33}m}{1 + dk_t/EA} \quad (2)$$

式中: E 为弹性模量; A 为面积; d 为厚度; k_t 为预紧弹簧的刚度。

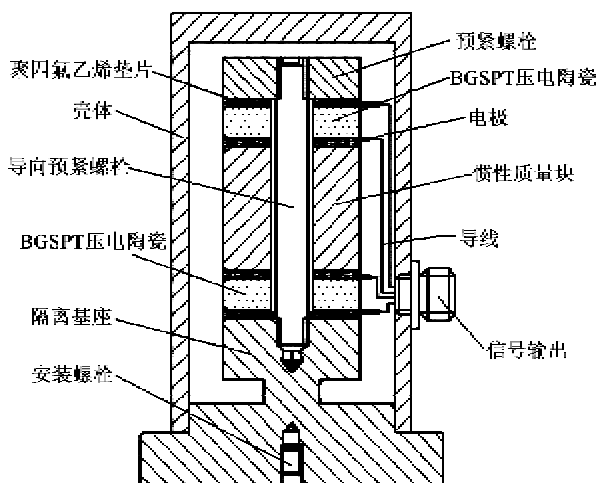


图2 压缩型加速度传感器设计图



图3 加速度传感器实物图

3 加速度传感器灵敏度与温度依赖关系

测试平台的系统包括:计算机、电荷放大器、加速度传感器、功率放大器和激振台(中国地震研究所),其工作流程如图4所示。工作过程为先由虚拟信号发生器产生数字信号,经D/A转换器变成模拟

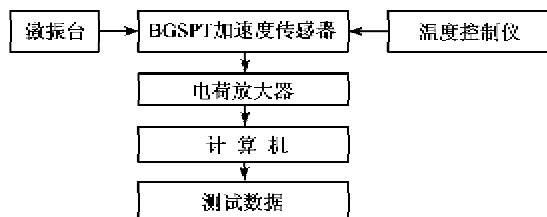


图4 BGSPT 加速度传感器灵敏度测试流程图

量输出,再由功率放大器放大后作为振动台的激振源;传感器把测到的振动信号输给电荷放大器再经信号调理后被送入采集卡经A/D转换后传输到计算机内进行数据处理,记录BGSPT加速度传感器的参考灵敏度(S)。

图5为BGSPT加速度传感器灵敏度与温度的依赖关系,在10 Hz下进行升温测试。BGSPT加速度传感器在激振台温度升高初期($T > 60^\circ\text{C}$),加速度传感器的 S 出现了一个快速上升过程。这是温度上升对陶瓷中少量处于游离状态的电荷与空位的激励,让这部分电荷和空位在热振动中达到平衡,这也是随后在测试温度过程中输出 S 逐渐平稳的原因。在图5中,在10 Hz下,BGSPT加速度传感器的相对 S 在 220°C 前保持相对稳定($S \approx 18 \text{ mV} \cdot \text{s}^2/\text{mm}$),当环境温度超过 220°C ,输出的 S 会出现明显下降趋势,该温度点处于BGSPT陶瓷的 T_c 一半的附近。BGSPT良好的压电性能是高灵敏度的重要条件,因此BGSPT加速度传感器的灵敏度优于压电活性弱的铌层状压电陶瓷^[12]。

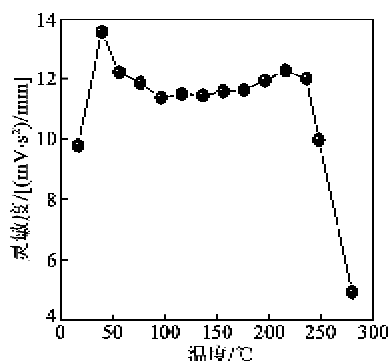


图5 BGSPT 加速度传感器灵敏度与温度的依赖关系

4 结论

1) 采用传统固相法制备了具有良好压电性能和较高居里温度的BGSPT66压电陶瓷,其压电系数 d_{33} 约为 320 pC/N ,居里温度 T_c 约为 465°C 。

2) 该传感器选用了BGSPT66高温压电陶瓷作为压电振子装配,在 $20 \sim 200^\circ\text{C}$ 获得稳定的信号输出,超过PZT压电陶瓷的温度应用范围($T \leq 120^\circ\text{C}$)。

3) BGSPT加速度传感器在 $20 \sim 200^\circ\text{C}$ 温度范围的灵敏度约为 $18 \text{ mV} \cdot \text{s}^2/\text{mm}$,当环境温度超过BGSPT陶瓷时,加速度传感器的相对灵敏度快速下降,表现出对环境温度强烈依赖。

(下转第555页)