

无铅压电陶瓷  $\text{Bi}_{0.5}(\text{Na}_{0.90-x}\text{K}_x\text{Li}_{0.10})_{0.5}\text{TiO}_3\text{-KNbO}_3$  的微结构与电学性能

Microstructure and Electrical Properties of  $\text{Bi}_{0.5}(\text{Na}_{0.90-x}\text{K}_x\text{Li}_{0.10})_{0.5}\text{TiO}_3\text{-KNbO}_3$  Lead-free Piezoelectric Ceramics

廖运文<sup>1, 2</sup>, 肖定全<sup>2</sup>

(1 西华师范大学 化学化工学院, 四川 南充 637002; 2 四川大学 材料科学系, 成都 610064)

LIAO Yun-wen<sup>1, 2</sup>, XIAO Ding-quan<sup>2</sup>

(1 College of Chemistry and Chemical Engineering, China West Normal University, Nanchong 637002, Sichuan, China; 2 Department of Materials Science, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

**摘要:** 采用传统陶瓷工艺制备了  $\text{Bi}_{0.5}(\text{Na}_{0.90-x}\text{K}_x\text{Li}_{0.10})_{0.5}\text{TiO}_3\text{-KNbO}_3$  无铅压电陶瓷, 利用 XRD, SEM 等测试技术分析表征了陶瓷的结构、表面形貌、介电、压电与铁电性能。结果表明: 该体系陶瓷具有单相钙钛矿结构,  $\text{KNbO}_3$  的引入使体系的居里温度和铁电-反铁电相变温度降低; 随着钾含量的增加,  $\text{KNbO}_3$  对体系性能的影响越明显。在室温下, 该体系表现出良好的压电与铁电性能: 压电常数  $d_{33}$  和机电耦合系数  $k_p$  分别达到 195 pC/N 和 31.9%, 陶瓷样品表现出明显的铁电体特征, 剩余极化强度  $P_r$  达到 34.8  $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ , 矫顽场强  $E_c$  为 3.2 kV/mm。

**关键词:**  $\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3$ ; 无铅压电陶瓷; 压电性能; 介电性能; 铁电性能

中图分类号: TM 282      文献标识码: A      文章编号: 1001-4381(2008)05-0039-04

**Abstract:** Lead-free piezoelectric ceramics,  $\text{Bi}_{0.5}(\text{Na}_{0.90-x}\text{K}_x\text{Li}_{0.10})_{0.5}\text{TiO}_3\text{-KNbO}_3$  were fabricated by conventional electric ceramics processes, and the microstructure, dielectric, piezoelectric and ferroelectric properties of the ceramics were investigated. X-ray diffraction patterns showed that  $\text{Bi}_{0.5}(\text{Na}_{0.90-x}\text{K}_x\text{Li}_{0.10})_{0.5}\text{TiO}_3\text{-KNbO}_3$  can form a solid solution during sintering. With the addition of  $\text{KNbO}_3$ , the dielectric, piezoelectric and ferroelectric properties of the ceramics strongly depended on the amount of  $\text{K}^+$ . At room temperature, the ceramics exhibited good performances with piezoelectric constant  $d_{33}=195\text{ pC/N}$ , electromechanical coupling factor  $k_p=31.9\%$ , remanent polarization  $P_r=34.8\mu\text{C}/\text{cm}^2$ , and coercive field  $E_c=3.2\text{ kV/mm}$ , respectively.

**Key words:** bismuth-sodium titanate; lead-free piezoelectric ceramic; piezoelectric property; dielectric property; ferroelectric property

以  $\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$  (简称 PZT) 为代表的铅基压电陶瓷因其性能优异, 在电子和微电子等领域已获得了广泛的应用。但是, 铅基压电陶瓷在制备、使用及废弃后处理过程中对环境及人类造成严重危害。随着环境保护和人类可持续发展的需求, 研究和开发非铅基环境协调型压电铁电材料与器件具有重要的科学意义和迫切的市场需求<sup>[1-3]</sup>。

$\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3$  (BNT) 是一类  $\text{ABO}_3$  钙钛矿型的 A 位离子复合铁电体<sup>[4]</sup>, 其居里温度为 320  $^{\circ}\text{C}$ , 在室温下具有很强的铁电性 ( $P_r=38\mu\text{C}/\text{cm}^2$ ), 被认为是无铅铁电材料最有希望的候选材料之一, 已成为当前无铅铁

电块体材料的研究热点之一。但因纯 BNT 铁电材料具有矫顽场高、难以极化和易潮解等缺点而很难实用化。近年来, BNT 基无铅压电陶瓷研究取得了较大进展, 发明了一系列性能优良的 A 位多重复合 BNT 基压电陶瓷<sup>[5-10]</sup>, 其中以  $\text{Bi}_{0.5}(\text{Na}_{1-x-y}\text{K}_x\text{Li}_y)_{0.5}\text{TiO}_3$  (BNKLT) 材料体系为代表。但是, 与铅基压电陶瓷相比, BNKLT 体系的性能离实际应用还有一定距离, 有待进一步改善和提高。目前的研究主要集中在对其掺杂改性和新的制备技术研究方面<sup>[11, 12]</sup>, 并取得了一定成效。

$\text{KNbO}_3$  是具有与钛酸钡结构相似的铁电体, 随着

温度的下降,依次发生立方结构-四方结构的顺电-铁电相变(435℃),四方结构-正交结构的铁电-铁电相变(225℃),以及正交结构-三角结构的铁电-铁电相变(-10℃)。由此可以看出,KNbO<sub>3</sub>的居里温度比Bi<sub>0.5</sub>(Na<sub>1-x-y</sub>K<sub>x</sub>Li<sub>y</sub>)<sub>0.5</sub>TiO<sub>3</sub>体系的居里温度(320℃左右)要高得多。本研究将KNbO<sub>3</sub>引入到Bi<sub>0.5</sub>(Na<sub>1-x-y</sub>K<sub>x</sub>Li<sub>y</sub>)<sub>0.5</sub>TiO<sub>3</sub>体系中,研究二者组合后形成新的固溶体体系的可能性,以及该体系的组成、结构与电学性能。

## 1 实验

采用传统电子陶瓷工艺,制备(1-z)(原子分数/% ,下同)Bi<sub>0.5</sub>(Na<sub>0.90-x</sub>K<sub>x</sub>Li<sub>0.10</sub>)<sub>0.5</sub>TiO<sub>3-z</sub>KNbO<sub>3</sub>无铅压电陶瓷。以Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>,Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>,K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>,TiO<sub>2</sub>,Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>为起始原料,按配方化学计量比称量。将原料混合物振动球磨6h,充分混合、粉碎后,于860~960℃,2h下进行预合成;合成后的陶瓷粉末充分研磨并过60目筛后,加入适量的粘结剂,造粒得到流动性好的颗粒;在一定压力下干压成型,获得厚度为1.2~1.5mm,直径为φ10mm的生坯片;并于1100℃左右下烧结得致密的陶瓷片。将陶瓷片用丝网印刷机涂上氧化银浆料,于600~700℃烧银获得上了电极的陶瓷样品。将此陶瓷样品在40~80℃下极化20~30min,放置一昼夜待测电性能。

用PHILIPS XPERT PRO型X射线扫描仪分析陶瓷样品的晶体结构;陶瓷样品的表面微观形貌用JSM-5900扫描电子显微镜观测;陶瓷样品的密度采用阿基米德法测定;用ZJ-3A准静态测量仪(中国科学院声学研究所)测量 $d_{33}$ ;用HP4278A表测得在1kHz条件下的介电常数 $\epsilon$ 和介电损耗 $\tan\delta$ ;介电温度谱采用计算机控制的智能控温箱和TH2816 LCR仪测定;采用谐振-反谐振法用HP4194A仪测得薄圆片样品的谐振频率 $f_r$ 和反谐振频率 $f_a$ 后,计算出机电耦合系

数 $k_p$ ;陶瓷样品的电滞回线采用Radiant Precision Workstation观测。

## 2 结果与讨论

### 2.1 XRD与SEM分析

图1给出了Bi<sub>0.5</sub>(Na<sub>0.90-x</sub>K<sub>x</sub>Li<sub>0.10</sub>)<sub>0.5</sub>TiO<sub>3-0.01</sub>KNbO<sub>3</sub>陶瓷的XRD图谱,从图1可以看出,在1100℃/2h的烧成条件下,所研究的陶瓷样品均形成了单一钙钛矿结构的固溶体,在所研究的组成范围内,当钾含量 $x \leq 0.185$ 时,XRD衍射峰(100),(110)向左偏移,表明晶面间距增大,四方相含量在逐渐增大。

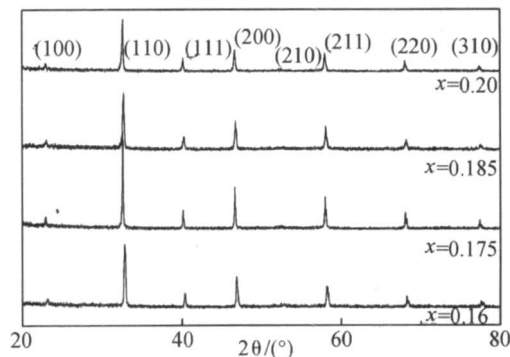


图1 Bi<sub>0.5</sub>(Na<sub>0.90-x</sub>K<sub>x</sub>Li<sub>0.10</sub>)<sub>0.5</sub>TiO<sub>3-0.01</sub>KNbO<sub>3</sub>陶瓷(1100℃/2h)的XRD图谱  
Fig. 1 XRD patterns of Bi<sub>0.5</sub>(Na<sub>0.90-x</sub>K<sub>x</sub>Li<sub>0.10</sub>)<sub>0.5</sub>TiO<sub>3-0.01</sub>KNbO<sub>3</sub> ceramics sintered at 1100℃ for 2h

图2给出了在1100℃保温2h的条件下烧结的不同组成的Bi<sub>0.5</sub>(Na<sub>0.90-x</sub>K<sub>x</sub>Li<sub>0.10</sub>)<sub>0.5</sub>TiO<sub>3-0.01</sub>KNbO<sub>3</sub>陶瓷样品表面微观形貌图。从图2可以看出,所研究的组成在1100℃/2h烧结均可获得结构致密的陶瓷。为了进一步考察该体系陶瓷样品的致密性,采用阿基米德法测定了各样品的密度,结果如表1所示。从表1可以看出,各样品的体积密度在5.8g/cm<sup>3</sup>以上,相对密度均在96%以上,说明该体系的陶瓷样品是较为

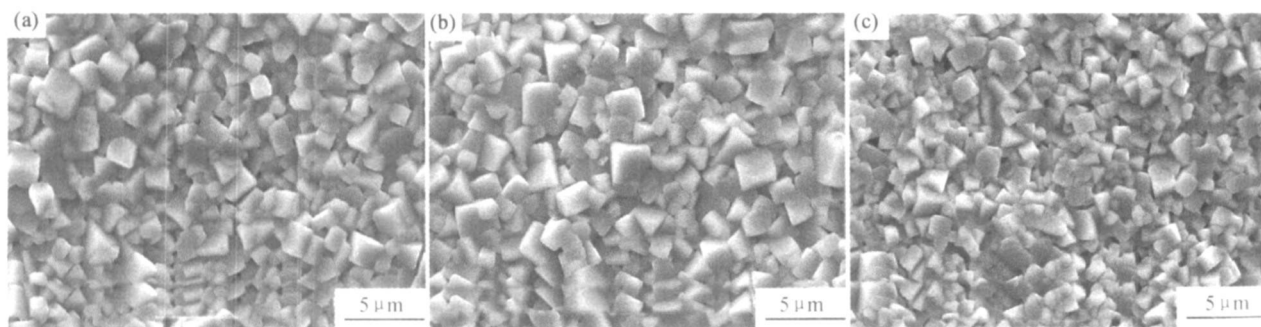


图2 Bi<sub>0.5</sub>(Na<sub>0.90-x</sub>K<sub>x</sub>Li<sub>0.10</sub>)<sub>0.5</sub>TiO<sub>3-0.01</sub>KNbO<sub>3</sub>陶瓷(1100℃/2h)的表面微观形貌图  
(a) $x = 0.16$ ; (b) $x = 0.175$ ; (c) $x = 0.185$

Fig. 2 SEM photographs of Bi<sub>0.5</sub>(Na<sub>0.90-x</sub>K<sub>x</sub>Li<sub>0.10</sub>)<sub>0.5</sub>TiO<sub>3-0.01</sub>KNbO<sub>3</sub> ceramics sintered at 1100℃ for 2h (a) $x = 0.16$ ; (b) $x = 0.175$ ; (c) $x = 0.185$

表 1  $(1-z)\text{Bi}_{0.5}(\text{Na}_{0.90-x}\text{K}_x\text{Li}_{0.10})_{0.5}\text{TiO}_3\text{-}z\text{KNbO}_3$  陶瓷 (1100 °C/ 2h) 的介电、压电性能

Table 1 Dielectric and piezoelectric properties of  $(1-z)\text{Bi}_{0.5}(\text{Na}_{0.90-x}\text{K}_x\text{Li}_{0.10})_{0.5}$

$\text{TiO}_3\text{-}z\text{KNbO}_3$  ceramics sintered at 1100 °C for 2h

Specimen	$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$d_{33}/(\text{pC}\cdot\text{N}^{-1})$	$k_p/\%$	$\epsilon_r$	$\tan\delta$	$Q_m$
$\text{Bi}_{0.5}(\text{Na}_{0.80}\text{K}_{0.10}\text{Li}_{0.10})_{0.5}\text{TiO}_3$	5.815	121	25.10	677	0.029	150
$x=0.10, z=0.01$	5.846	142	27.40	724	0.045	141
$\text{Bi}_{0.5}(\text{Na}_{0.75}\text{K}_{0.15}\text{Li}_{0.10})_{0.5}\text{TiO}_3$		155	30.75	846	0.032	106
$x=0.15, z=0.01$	5.833	172	31.50	985	0.047	88
$\text{Bi}_{0.5}(\text{Na}_{0.74}\text{K}_{0.16}\text{Li}_{0.10})_{0.5}\text{TiO}_3$		180	33.31	926	0.034	105
$x=0.16, z=0.01$	5.828	195	31.90	1091	0.053	75
$\text{Bi}_{0.5}(\text{Na}_{0.725}\text{K}_{0.175}\text{Li}_{0.10})_{0.5}\text{TiO}_3$		198	37.20	1006	0.038	91
$x=0.175, z=0.01$	5.816	124	20.30	1266	0.046	79
$x=0.185, z=0.01$	5.811	25	—	1367	0.040	—
$\text{Bi}_{0.5}(\text{Na}_{0.80}\text{K}_{0.20}\text{Li}_{0.10})_{0.5}\text{TiO}_3$		231	32.00	1304	0.0478	67
$x=0.20, z=0.01$	5.806	24		1376	0.043	—

The symbol ‘—’ notes this property can’t be measured due to the bad resonance characteristic.

致密的。从 SEM 图片中还可以看出, 在 1100 °C/ 2h 烧结, 陶瓷晶粒饱满, 晶界清晰; K 含量对晶粒尺寸有较明显的影响, 当  $x=0.185$  时, 晶粒尺寸急剧减小, 表明 K 达到一定含量时会抑制晶粒的生长<sup>[5]</sup>。

2.2 陶瓷的介电性能

从表 1 可以看出, 随着钾含量的增加,  $\text{Bi}_{0.5}(\text{Na}_{0.90-x}\text{K}_x\text{Li}_{0.10})_{0.5}\text{TiO}_3\text{-KNbO}_3$  体系陶瓷的相对介电常数增大, 而损耗先增大, 当钾含量超过 0.16 时损耗开始减小。KNbO<sub>3</sub> 对该体系介电性能的影响还随钾含量的不同而有差异。当钾含量  $x=0.10$  时, 与  $\text{Bi}_{0.5}(\text{Na}_{0.90-x}\text{K}_x\text{Li}_{0.10})_{0.5}\text{TiO}_3$  比较, 添加了 KNbO<sub>3</sub> 后陶瓷的介电常数增大, 损耗也增大; 而当  $x=0.20$  时, 添加了 KNbO<sub>3</sub> 后陶瓷的介电常数增大而介电损耗却有所降低。

图 3 给出了该体系陶瓷的相对介电常数和介电损耗随温度的变化曲线。从图 3 可以看出, KNbO<sub>3</sub> 的掺入使陶瓷的居里温度有所减小, 而钾含量  $x$  变化对陶瓷的居里温度影响不大。当低于居里温度时, 陶瓷的介温谱线出现了介温峰或介温平台, 同时, 介电损耗温度曲线在该位置出现了介电损耗峰, 其原因是该体系在介温平台附近存在由铁电相转变为反铁电相的相变<sup>[13]</sup>, 而且随着 KNbO<sub>3</sub> 的掺入和钾含量的增加, 相变温度逐渐向低温方向移动。

2.3 陶瓷的压电性能

从表 1 可以看出, 随着 K 含量的增加,  $\text{Bi}_{0.5}(\text{Na}_{0.90-x}\text{K}_x\text{Li}_{0.10})_{0.5}\text{TiO}_3\text{-}0.01\text{KNbO}_3$  体系陶瓷的压电常数  $d_{33}$  和平面机电耦合系数  $k_p$  逐渐增大, 在  $x=0.16$  时达到最大, 压电常数  $d_{33}$  和平面机电耦合系数  $k_p$  分别为 195 pC/N 和 31.9%。KNbO<sub>3</sub> 的引入和 K

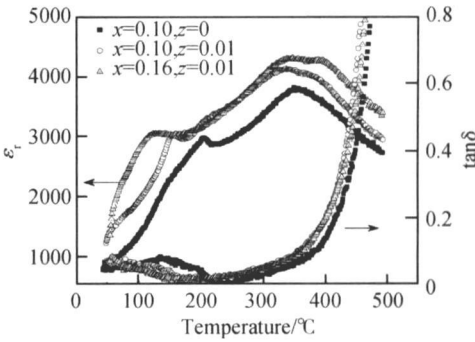


图 3  $\text{Bi}_{0.5}(\text{Na}_{0.90-x}\text{K}_x\text{Li}_{0.10})_{0.5}\text{TiO}_3\text{-}0.01\text{KNbO}_3$  陶瓷 (1100 °C/ 2h) 的介温曲线  
Fig. 3 Temperature dependency of permittivity and loss tangent of  $\text{Bi}_{0.5}(\text{Na}_{0.90-x}\text{K}_x\text{Li}_{0.10})_{0.5}\text{TiO}_3\text{-KNbO}_3$  ceramics sintered at 1100 °C for 2h

含量的增加, 陶瓷的机械品质因子有所减小。从表 1 中可以看出, K 含量越低, KNbO<sub>3</sub> 对陶瓷性能的影响越小,  $x\leq 0.16$  时, 添加 1mol% 的 KNbO<sub>3</sub> 的压电性能高于不含 KNbO<sub>3</sub> 成分的陶瓷的压电性能, 随着 K 含量的增加, 其性能与  $\text{Bi}_{0.5}(\text{Na}_{0.90-x}\text{K}_x\text{Li}_{0.10})_{0.5}\text{TiO}_3$  相差越大, 当  $x=0.20$  时, 陶瓷的压电性能极差, 压电常数  $d_{33}$  只有 24 pC/N, 谐振特性很差。表明随着钾含量的增加, KNbO<sub>3</sub> 对体系性能的影响越明显。这是由于 KNbO<sub>3</sub> 为四方相结构, KNbO<sub>3</sub> 的引入势必改变原体系  $\text{Bi}_{0.5}(\text{Na}_{0.90-x}\text{K}_x\text{Li}_{0.10})_{0.5}\text{TiO}_3$  的相界, 即当  $x$  较小时就进入三方四方准同型相界, 所以当  $x=0.16$  时体系的压电性能就达到最佳, 而  $\text{Bi}_{0.5}(\text{Na}_{0.90-x}\text{K}_x\text{Li}_{0.10})_{0.5}\text{TiO}_3$  体系出现最佳性能是在  $x=0.20$ 。这与其结构特征是相吻合的。

## 2.4 陶瓷的铁电性能

图 4 为  $\text{Bi}_{0.5}(\text{Na}_{0.90-x}\text{K}_x\text{Li}_{0.10})_{0.5}\text{TiO}_3\text{-KNbO}_3$  部分组成陶瓷样品的电滞回线。从图 4 可以看出,所有样品的电滞回线的矩形度都很好,剩余极化强度高,当  $x=0.15$  时达到最大( $34.8\mu\text{C}/\text{cm}^2$ )。 $\text{KNbO}_3$  的掺入使矫顽场强有较明显的减小,而剩余极化强度变化不大。随着钾离子含量的增加,矫顽场强逐渐减小。当  $x=0.16$  时,矫顽场强  $E_c$  减小到  $3.2\text{ kV}/\text{mm}$ ,有利于陶瓷的充分极化,而剩余极化强度仍然保持较高的值( $32\mu\text{C}/\text{cm}^2$ ),这是该组成呈现较好压电性能的原因<sup>[14]</sup>。

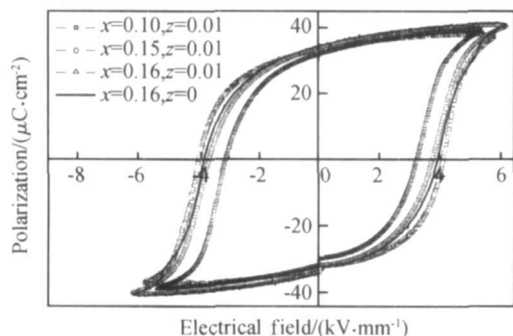


图 4  $(1-z)\text{Bi}_{0.5}(\text{Na}_{0.90-x}\text{K}_x\text{Li}_{0.10})_{0.5}\text{TiO}_3\text{-}z\text{KNbO}_3$  陶瓷样品的  $P$ - $E$  电滞回线

Fig. 4  $P$ - $E$  curves of  $(1-z)\text{Bi}_{0.5}$

$(\text{Na}_{0.90-x}\text{K}_x\text{Li}_{0.10})_{0.5}\text{TiO}_3\text{-}z\text{KNbO}_3$  ceramics

## 3 结论

(1) 该体系在所研究的组成范围内均能形成固熔体。

(2) 少量  $\text{KNbO}_3$  的引入使体系的居里温度和铁电-反铁电相变温度降低,矫顽场强减小。

(3) 随着钾含量的增加, $\text{KNbO}_3$  对体系性能的影响越明显。

(4) 在室温下,该体系  $\text{Bi}_{0.5}(\text{Na}_{0.74}\text{K}_{0.16}\text{Li}_{0.10})_{0.5}\text{TiO}_3\text{-}0.01\text{KNbO}_3$  陶瓷样品表现出良好的压电与铁电性能:压电常数  $d_{33}$  和机电耦合系数  $k_p$  分别达到  $195\text{ pC}/\text{N}$  和  $31.9\%$ ,剩余极化强度  $P_r$  达到  $34.8\mu\text{C}/\text{cm}^2$ ,矫顽场强  $E_c$  为  $3.2\text{ kV}/\text{mm}$ 。

### 参考文献

[1] 肖定全, 万征. 环境协调型压电铁电陶瓷[J]. 压电与声光, 1999,

21 (5): 363- 366.

- [2] 肖定全. 关于无铅压电陶瓷及其应用的几个问题[J]. 电子元件与材料, 2004, 23(11): 62- 65.
- [3] CROSS E. Lead-free at last[J]. Nature, 2004, 432: 24- 25.
- [4] SMOLENSKY G A, ISUPOV V A, AGRANOVSKAYA A, et al. New ferroelectrics of complex composition[J]. Sov Phys Solid State, 1961, 2(11): 2651- 2654.
- [5] LIN D M, XIAO D Q, ZHU J G, et al. Synthesis and piezoelectric properties of lead-free piezoelectric ceramics of  $[\text{Bi}_{0.5}(\text{Na}_{1-x-y}\text{K}_x\text{Li}_y)_{0.5}]\text{TiO}_3$  system[J]. Mater Lett, 2004, 58(5): 615- 618.
- [6] LIN D M, XIAO D Q, ZHU J G, et al. Electrical properties of  $[\text{Bi}_{1-z}(\text{Na}_{1-x-y-z}\text{K}_x\text{Li}_y)_{0.5}\text{Ba}_z\text{TiO}_3]$  multi-component lead-free piezoelectric ceramics[J]. Phys Stat Sol (a), 2005, 202(9): 89- 91.
- [7] LIN D M, XIAO D Q, ZHU J G, et al. Piezoelectric and ferroelectric properties of lead-free  $[\text{Bi}_{1-y}(\text{Na}_{1-x-y}\text{Li}_x)]_{0.5}\text{Ba}_y\text{TiO}_3$  ceramics[J]. J Europ Ceram Soc, 2006, 26(15): 3247- 3251.
- [8] WANG X X, TANG X G, CHAN H L W. Electromechanical and ferroelectric properties of  $\text{Bi}_{1/2}\text{Na}_{1/2}\text{TiO}_3\text{-}\text{Bi}_{1/2}\text{K}_{1/2}\text{TiO}_3\text{-}\text{BaTiO}_3$  lead-free piezoelectric ceramics[J]. Appl Phys Lett, 2004, 85(1): 91- 93.
- [9] YOO J Y, OH D G, JEONG Y H, et al. Dielectric and piezoelectric characteristics of lead-free  $\text{Bi}_{0.5}(\text{Na}_{0.84}\text{K}_{0.16})_{0.5}\text{TiO}_3$  ceramics substituted with Sr[J]. Mater Lett, 2004, 58(8): 3831- 3835.
- [10] LIAO Y W, XIAO D Q, LIN D M, et al. Synthesis and properties of  $\text{Bi}_{0.5}(\text{Na}_{1-x-y}\text{K}_x\text{Ag}_y)_{0.5}\text{TiO}_3$  lead-free piezoelectric ceramics[J]. Ceramics International, 2008, 107: 413- 417.
- [11] LIAO Y W, XIAO D Q, LIN D M, et al. The effects of  $\text{CeO}_2$ -doping on piezoelectric and dielectric properties of  $\text{Bi}_{0.5}(\text{Na}_{1-x-y}\text{K}_x\text{Li}_y)_{0.5}\text{TiO}_3$  ceramics[J]. Mater Sci Eng B, 2006, 133(1- 3): 172- 176.
- [12] 廖运文, 侯敦敏, 肖定全, 等. 钛酸铋钠钾锂无铅陶瓷的柠檬酸盐制备技术[J]. 无机盐工业, 2006, 38(2): 19- 21.
- [13] TAKENAKA T, MARUYAMA K, SAKATA K.  $(\text{Na}_{0.5}\text{Bi}_{0.5})\text{TiO}_3\text{-}0.1\text{BaTiO}_3$  system for lead-free piezoelectric ceramics[J]. Jpn J Appl Phys, 1991, 30(9B): 2236- 2239.
- [14] 王天宝, 高敏, 王列娥, 等. 非铅系统压电陶瓷的研究[J]. 无机材料学报, 1987, 2(3): 223- 232.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50572066); 四川省教育部重点资助项目(2006A075)

收稿日期: 2007-09-24; 修订日期: 2008-01-30

作者简介: 廖运文(1971—), 男, 博士, 副教授, 主要从事功能材料物理与化学方面的研究, 联系地址: 四川南充西华师范大学化学化工学院(637002)。E-mail: liaoyw@163.com