

文章编号: 1005-8893 (2004) 03-0061-04

# $(\text{Bi}_{1/2}\text{Na}_{1/2})_{1-x}\text{Ba}_x\text{TiO}_3$ 系无铅压电陶瓷的现状<sup>\*</sup>

周丽敏, 李 坤

(江苏工业学院 材料科学与工程系, 江苏 常州 213016)

摘要: 综述了  $(\text{Bi}_{1/2}\text{Na}_{1/2})_{1-x}\text{Ba}_x\text{TiO}_3$  系无铅压电陶瓷的最新研究进展。简述了 A 位非化学计量改性及几种较成功的掺杂改性方法。将 A 位掺杂 (如  $\text{La}^{3+}$ )、B 位掺杂 (如  $\text{Co}^{3+}$ 、 $\text{Nb}^{5+}$ ) 以及综合掺杂 (如  $\text{Ce}^{3+}$ 、 $\text{Ce}^{4+}$ ) 的优缺点和掺杂机理进行了归类比较。解释了各系统中相应掺杂引起性能变化的原因, 为进一步开展无铅压电陶瓷的研究提供参考。

关键词: 钛酸铋钠-钛酸钡; 无铅陶瓷; 压电陶瓷

中图分类号: TQ 174

文献标识码: A

随着人们环保意识的加强, 无铅压电陶瓷日益受到重视。目前, 主要的无铅压电陶瓷体系有 BT、BNT、Bi 层结构及铌酸盐基压电陶瓷。其中, BT ( $\text{BaTiO}_3$ ) 陶瓷的压电性能属于中等水平, 难以通过掺杂大幅度改性来满足不同的需要; 居里点仅为  $120\text{ }^\circ\text{C}$ ; 工作温区狭窄; 在室温附近存在相变; 烧结一般需在  $1\ 300\text{ }^\circ\text{C}$  左右进行, 且存在一定难度<sup>[1]</sup>。而铋层状结构化合物虽然一般具有居里温度高、介电常数低、机械品质因数  $Q_m$  高、烧结温度较低等特征, 但它存在压电活性低的缺点<sup>[2]</sup>。作为压电陶瓷, 铌酸盐基陶瓷的压电常数  $d_{33}$  不够高, 且 Nb 的价格昂贵, 不利于实用化。

相比之下, 钛酸铋钠 ( $\text{Bi}_{1/2}\text{Na}_{1/2}\text{TiO}_3$ , 简称 BNT) 被认为是一种更有可能取代铅基压电陶瓷的无铅压电陶瓷体系。它是 1960 年由 Smolensky 等人发现的 A 位复合离子钙钛矿型铁电体, 居里温度为  $320\text{ }^\circ\text{C}$ , 室温下剩余极化强度  $P_r = 38\text{ }\mu\text{C}/\text{cm}^2$ 。BNT 陶瓷具有铁电性强、压电系数大 ( $k_1$ 、 $k_{33}$  约为  $40\% \sim 50\%$ )、介电常数小及声学性能好等优良特性, 且烧结温度低, 因而受到广泛研究。然而, BNT 陶瓷因具有相当大的矫顽场 ( $E_c = 73\text{ kV}/\text{cm}$ ) 及较高的电导率而难以极化; 加之该

体系的烧结温度范围较窄, 从而使得单纯的 BNT 陶瓷难以实用化<sup>[3, 4]</sup>。

针对 BNT 陶瓷因过高的矫顽场而难以极化的问题, 人们进行了大量的研究。目前的工作主要集中在引入第二组元化合物与 BNT 形成固溶体, 并通过对 A 位或 B 位的取代, 来降低 BNT 过高的矫顽场  $E_c$  方面。已有报道表明, 用  $\text{BaTiO}_3$ <sup>[5~7]</sup>、 $\text{NaNbO}_3$ <sup>[7~9]</sup>、 $\text{BiFeO}_3$ <sup>[10]</sup>、 $\text{Bi}_2\text{O}_3 \cdot \text{Sc}_2\text{O}_3$ <sup>[11]</sup>、 $\text{SrTiO}_3$ <sup>[12, 5]</sup>、 $\text{La}_2\text{O}_3$ <sup>[13]</sup> 及  $\text{Eu}_2\text{O}_3$ <sup>[14]</sup> 等改性的 BNT 基陶瓷与纯 BNT 陶瓷相比具有更好的压电性, 同时改性后的陶瓷易于极化。

在这些 BNT 基系统中, 特别是  $(1-x)\text{Bi}_{1/2}\text{Na}_{1/2}\text{TiO}_3 - x\text{BaTiO}_3$  (简称 BNBT) 二元系陶瓷, 因其压电常数、机电耦合系数较大, 而受到了较大的关注。但与 PZT 基含铅陶瓷相比, 其性能还存在一定的差距, 仍需进一步改性, 本文对 BNBT 系陶瓷的改性方法进行了归纳。

## 1 BNBT 系无铅压电陶瓷的性能

在 BNT 中引入第二组元  $\text{BaTiO}_3$  (BT), 对 A 位的  $(\text{Bi}_{1/2}\text{Na}_{1/2})$  进行取代, 可形成  $(1-x)\text{BNT} - x\text{BT}$  固溶体系统。  $\text{Ba}^{2+}$  离子半径 ( $r_{\text{Ba}^{2+}} =$

\* 收稿日期: 2004-05-17

基金资助: 江苏工业学院科技基金资助

作者简介: 周丽敏 (1978-), 女, 浙江诸暨人, 助教。

0.135 nm) 比  $\text{Na}^+$  离子半径 ( $r_{\text{Na}^+} = 0.099 \text{ nm}$ ) 及  $\text{Bi}^{3+}$  离子半径 ( $r_{\text{Bi}^{3+}} = 0.103 \text{ nm}$ )<sup>[15]</sup> 大, 其部分置换  $(\text{Bi}_{1/2}\text{Na}_{1/2})^{2+}$  后虽不会破坏晶胞的电中性, 但由于半径不同, 会产生晶格畸变。这样, 在极化处理时, 有利于晶格自发极化的转向, 即按电场方向自发极化定向排列的程度增加, 从而提高了它的压电活性。

T. Takenaka<sup>[9]</sup> 等人系统地研究了  $(\text{Bi}_{1/2}\text{Na}_{1/2})_{1-x}\text{Ba}_x\text{TiO}_3$  陶瓷的介电、压电和铁电性能。X 射线分析数据显示, 在室温下 BNT 为三方相<sup>[4]</sup>,  $\text{BaTiO}_3$  为四方相, 它们在一定区域形成三方—四方 (FR—FT) 准同型相界 (MPB)。根据准同型相界的定义, 在准同型相界附近, 该体系中有三方与四方相共存, 许多压电参数 (如  $d_{33}$ 、 $k_t$ ) 和介电参数 (如  $\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$ ) 出现最大值。根据实验结果, T. Takenaka 等人认为当  $x$  在 0.06 附近时 BNBT 体系存在准同型相界。Bao—Jin Chu 等人得到的结果也与此吻合<sup>[16]</sup>。T. Takenaka 等人得到的  $(\text{Bi}_{1/2}\text{Na}_{1/2})_{0.94}\text{Ba}_{0.06}\text{TiO}_3$  陶瓷的压电性能见表 1。

表 1  $(\text{Bi}_{1/2}\text{Na}_{1/2})_{0.94}\text{Ba}_{0.06}\text{TiO}_3$  的压电性能

Table 1 Piezoelectric properties of  $(\text{Bi}_{1/2}\text{Na}_{1/2})_{0.94}\text{Ba}_{0.06}\text{TiO}_3$

$\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$	$\tan \delta$	$k_{33}/\%$	$N_{33}/\text{Hz}\cdot\text{m}$	$N_p/\text{Hz}\cdot\text{m}$	$d_{33}/10^{-12}\text{C}/\text{N}$	$T_c/\text{K}$	$E_c/\text{kV}/\text{cm}$
580	1.3	55.0	2 507	2 975	125	561	30

通过引入钛酸钡组元, T. Takenaka 等人降低了 BNT 过高的矫顽场, 避免了因 BNT 铁电相较高的电导率导致的极化困难, 获得了具有相当压电活性的材料。但是, 与含铅的 PZT 基陶瓷相比 BNBT 系陶瓷的压电、介电性能还有一定差距, 主要表现为其  $Q_m$  和  $d_{33}$  偏小, 而介电损耗  $\tan \delta$  偏大。所以仍有必要采用各种方法进一步对 BNBT 系陶瓷进行改性, 这也是目前无铅压电陶瓷研究中的一个重要方向。

## 2 BNBT 系无铅压电陶瓷的改性

### 2.1 A 位非化学计量改性

Bao—Jin Chu<sup>[16]</sup> 等人以  $(\text{Bi}_{1/2}\text{Na}_{1/2})_{0.92}\text{Ba}_{0.08}\text{TiO}_3$  (记为 BNBT8) 陶瓷为基体, 讨论了 A 位非化学计量, 即 A 位多加和少加  $(\text{Bi}_{1/2}\text{Na}_{1/2})^{2+}$  改性对陶瓷压电性能及退极化温度的影响。

由 X 射线衍射数据知 BNBT8 的结构为四方相, 所以试样在极化时其  $90^\circ$  铁电畴充分地转向会提高其压电性能。当在 A 位少加  $(\text{Bi}_{1/2}\text{Na}_{1/2})^{2+}$  时

就会产生 A 位空位, 从而使晶格松弛, 缓冲了  $90^\circ$  畴转向所造成的应力, 使  $90^\circ$  畴的转向更加充分, 导致压电系数增大; 而在 A 位多加  $(\text{Bi}_{1/2}\text{Na}_{1/2})^{2+}$  时, 会产生 B 位的空位。一方面, B 位的空位与 A 位空位相类似, 也会使晶格松弛, 有利于提高压电系数; 另一方面因为自发极化主要是由 B 位阳离子位移所引起的, 所以 B 位的空位会削弱 B 位对自发极化的贡献, 不利于提高压电系数。这两方面作用同时存在, 但在 Bao—Jin Chu 等人的试验中, 前一种影响起主要作用, 即 A 位多加  $(\text{Bi}_{1/2}\text{Na}_{1/2})^{2+}$  的试样, 其压电性也是提高的。

根据 Bao—Jin Chu 等人的实验结果, A 位多加和少加  $(\text{Bi}_{1/2}\text{Na}_{1/2})^{2+}$  分别使体系的压电常数从 BNBT8 的 112 pC/N 提高到了 125 和 140 pC/N, 这为提高 BNBT 基陶瓷的压电性提供了一种方法; 但同时, 陶瓷的去极化温度分别从 BNBT8 的  $140^\circ\text{C}$  降低到了  $135^\circ\text{C}$  和  $125^\circ\text{C}$ 。

### 2.2 掺杂 $\text{M}_2\text{O}_3$ 改性

Hui—dong Li<sup>[17]</sup> 等人研究了三价离子  $\text{La}^{3+}$ 、 $\text{Co}^{3+}$  对 BNBT6 系统压电和介电性能的影响。他们所得试样的介电和压电性能见表 2。

表 2 BNBT6 及其改性产物的介电和压电性<sup>[17]</sup>

Table 2 Dielectric and piezoelectric properties of BNBT—6 and the modified BNBT—6 compositions

	BNBT 6	BNBT6—La	BNBT6—Co
$\epsilon_{33}^T$	776	1 576	1 200
$\tan \delta/\%$	2.5	4.5	2.3
$d_{33}/(\text{pC}/\text{N})$	117	125	139
$k_t$	0.43	0.38	0.46
$k_p$	0.28	0.24	0.27
$Q_m$	256	182	253

由表 2 可见, 添加了  $\text{La}^{3+}$  的试样, 在室温下的介电常数远大于 BNBT6 的, 其  $d_{33}$  也有所提高, 而  $Q_m$  下降了。这些变化类似于 PZT 基陶瓷中的“软掺杂”现象。 $\text{La}^{3+}$  半径为 0.106 nm, 它最有可能占据 A 位, 又因为它和  $\text{Bi}^{3+}$  的电价相等, 所以它将取代 A 位的  $\text{Bi}^{3+}$ 。 $\text{La}^{3+}$  与  $\text{Bi}^{3+}$  半径的不同将导致晶体结构发生畸变, 这有利于极化过程中畴的转向, 由此解释了为什么  $d_{33}$  会提高。

$\text{Co}^{3+}$  离子半径为 0.063 nm, 非常接近于  $\text{Ti}^{4+}$  的离子半径 (0.068 nm)。根据晶体化学的规则,  $\text{Co}^{3+}$  最可能取代  $\text{Ti}^{4+}$  进入钙钛矿系统的 B 位。当  $\text{Co}^{3+}$  进入 B 位时, 由于  $\text{Co}^{3+}$  的电价比  $\text{Ti}^{4+}$  的低, 就会产生氧空位以补偿电荷。因此, Bao—Jin Chu

等人<sup>[14]</sup>认为在BNBT中掺杂低价Co<sup>3+</sup>,就类似于在PZT基陶瓷中引入“硬掺杂”,这会使得体系的tan δ、压电常数、介电常数减小。

表2中Hui—dong Li<sup>[17]</sup>等人的实验结果显示,掺杂Co<sup>3+</sup>后试样的tan δ略有减小,而ε<sub>33</sub><sup>T</sup>、d<sub>33</sub>都得到了提高,其d<sub>33</sub>升高到了139 pC/N。从他们所拍的SEM显微照片中可以看到,掺杂Co<sup>3+</sup>后试样的晶粒直径增大了2倍多,这可以用来解释其压电性能的变化,即晶粒充分地生长使得畴的发展更完全,从而使得陶瓷的压电性得到了提高。

2.3 掺杂MO<sub>2</sub>改性

Xiaoxing Wang<sup>[18]</sup>等人通过在(Bi<sub>1/2</sub>Na<sub>1/2</sub>)<sub>0.94</sub>Ba<sub>0.06</sub>TiO<sub>3</sub>陶瓷中添加CeO<sub>2</sub>来提高其性能。他们认为,在BNBT陶瓷中添加一定量的CeO<sub>2</sub>能够明显地提高其压电和介电性能,实现增大耦合系数和降低损耗系数的双重效应。

图1给出了添加w(CeO<sub>2</sub>)=0~1%的BNBT陶瓷的压电和介电性,他们的结果表明,随着CeO<sub>2</sub>的添加耦合系数、压电常数以及介电常数

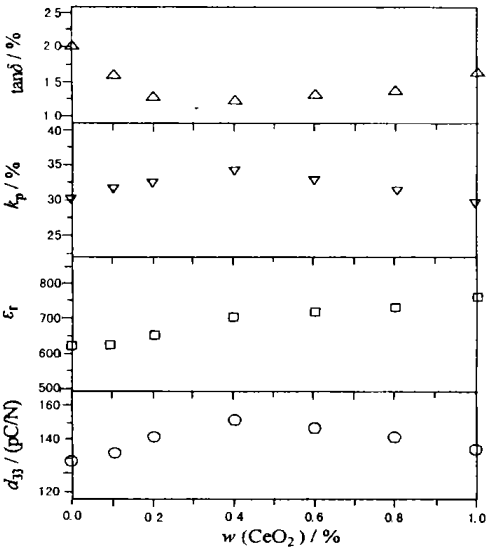


图1 CeO<sub>2</sub>添加量对(Bi<sub>1/2</sub>Na<sub>1/2</sub>)<sub>0.92</sub>Ba<sub>0.08</sub>TiO<sub>3</sub>电性能的影响

Fig. 1 Electrical properties of (Bi<sub>1/2</sub>Na<sub>1/2</sub>)<sub>0.92</sub>Ba<sub>0.08</sub>TiO<sub>3</sub> ceramics as a function of addition amount of CeO<sub>2</sub>

都有所增大,同时损耗系数降低了。添加w(CeO<sub>2</sub>)=0.4%时,BNBT陶瓷的压电性有明显的提高。压电常数从纯BNBT的128 pC/N增长到152 pC/N,损耗系数从2%降低到了1.2%。CeO<sub>2</sub>的作用机理非常复杂。添加了CeO<sub>2</sub>的BNBT陶瓷仍然是四方相与三角相共存的体系,其晶体结构没有明显的变化。Ce离子在BNBT结构中可能以

Ce<sup>4+</sup>和Ce<sup>3+</sup>两种价态出现,系统最终的性能可能就是它们同时作用的结果。另外,添加w(CeO<sub>2</sub>)=0.4%使得室温下BNBT陶瓷的剩余极化强度从32.5 μC/cm<sup>2</sup>增加到了37.7 μC/cm<sup>2</sup>,同时BNBT陶瓷的矫顽磁场E<sub>c</sub>也略有降低。由其性能可见,这是目前所得结果中效果比较好的一种改性方法。

2.4 掺杂M<sub>2</sub>O<sub>5</sub>改性

Bao—Jin Chu<sup>[14]</sup>等人认为,在BNBT系陶瓷的B位进行掺杂时对其压电性能的影响类似于PZT基陶瓷中的相应规则。即高价的Nb<sup>5+</sup>离子可以被看作是“软掺杂”,它的加入将使得BNBT8的ε<sub>33</sub><sup>T</sup>、d<sub>33</sub>以及tan δ都有所增大。Hui—dong Li等人<sup>[17]</sup>在用Nb<sup>5+</sup>对BNBT6进行改性时,也得到了相应的结果(见表3),只是所得d<sub>33</sub>的变化不大。

表3 Nb<sup>5+</sup>掺杂对BNBT陶瓷性能的影响<sup>[16,17]</sup>

Table 3	Influences of Nb <sup>5+</sup> on properties of BNBT ceramics <sup>[16,17]</sup>			
	BNBT8	BNBT8—Nb	BNBT6	BNBT6—Nb
ε <sub>33</sub> <sup>T</sup>	841	1 230	776	1 614
tan δ / %	2.04	3.90	2.50	4.60

2.5 不同价离子同时掺杂改性

Hui—dong Li等人<sup>[17]</sup>尝试了同时掺杂电价不等的La<sup>3+</sup>和Nb<sup>5+</sup>来对BNBT6进行改性。他们发现,与单独添加La<sup>3+</sup>或Nb<sup>5+</sup>的结果相比,同时掺杂时系统的d<sub>33</sub>有了进一步的提高,而其损耗系数tan δ基本上没有变化,这表明两种“软掺杂”共同作用进一步提高了系统的介电和压电性能。不幸的是,其Q<sub>m</sub>又降低了。

Xiao—xing Wang等人<sup>[19]</sup>将Cu<sup>2+</sup>、W<sup>6+</sup>与Ba<sup>2+</sup>预制成Ba(Cu<sub>1/2</sub>W<sub>1/2</sub>)O<sub>3</sub>(BCW)再加入BNT中,考察了BCW添加量对BNT基陶瓷性能的影响。我们也可以将此看作是用Cu<sup>2+</sup>、W<sup>6+</sup>共同对BNBT系陶瓷进行改性。目前对此类改性方法的报道还较少,可以在这方面做更多的工作。

3 小结

钛酸钡的引入降低了BNT过高的矫顽场,避免了因BNT铁电相对较高的电导率导致的极化困难,获得了具有相当压电活性的材料。但与含铅的PZT基陶瓷相比BNBT系陶瓷的压电、介电性能还有一定的差距,所以仍需采用各种方法进一步对BNBT系陶瓷进行改性。

目前对 BNBT 压电陶瓷的研究主要以借鉴 PZT 的经验为主。在已报道的文献中, 通过 A 位非化学计量改性, 在 A 位多加和少加 ( $\text{Bi}_{1/2}\text{Na}_{1/2}$ )<sup>2+</sup> 都使体系的压电常数得到了提高; 而在掺杂不同价态的离子进行改性后, 所得试样的压电、介电性能也都得到了一定的改善, 但仍存在不足。

尽管目前 BNBT 系无铅压电陶瓷的研究已取得了一定的进展, 但离取代含铅系压电陶瓷 (尤其是在压电变压器方面的应用中) 还有很大的差距, 仍要在提高  $Q_m$ 、 $\tan \delta$  方面进行更进一步的研究。

## 参考文献:

- [1] 肖定全. 压电、热释电与铁电材料 [M]. 天津: 天津大学出版社, 2000.
- [2] 晏海学, 李承恩, 周家光, 等. 高 Tc 铋层状压电陶瓷结构与性能 [J]. 无机材料学报, 2000, 15 (2): 209—220.
- [3] Smolensky G A, Isupov V A. New Ferroelectrics of Complex Composition [J]. Soviet Physics Solid State, 1961, 2 (11): 2 651—2 654.
- [4] Takenaka T, Sakata K. Dielectric, Piezoelectric and Pyroelectric Properties of ( $\text{Bi}_{1/2}\text{Na}_{1/2}$ )  $\text{TiO}_3$ —Based Ceramics [J]. Ferroelectrics, 1989, 95: 153—156.
- [5] Gomah—Pettry Jean—Richard, Sâd Senda, Marchet Pascal et al. Sodium—Bismuth Titanate Based Lead—Free Ferroelectric Materials [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2004, 24 (6): 1 165—1 169.
- [6] Takenaka T, Maruyama K—I, Sakata K. ( $\text{Bi}_{1/2}\text{Na}_{1/2}$ )  $\text{TiO}_3$ — $\text{BaTiO}_3$  System for Lead—Free Piezoelectric Ceramics [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1991, 30 (9B): 2 236—2 239.
- [7] Takenaka T. Piezoelectric Properties of Some Lead—Free Ferroelectric Ceramics [J]. Ferroelectrics, 1999, 230: 87—98.
- [8] Takenaka T, Okuda T, Takegahara K. Lead—Free Piezoelectric Ceramics Based on ( $\text{Bi}_{1/2}\text{Na}_{1/2}$ )  $\text{TiO}_3$ — $\text{NaNbO}_3$  [J]. Ferroelectrics, 1997, 196: 175—178.
- [9] Wada T, Toyoiike K, Imanaka Y, et al. Dielectric and Piezoelectric Properties of ( $\text{A}_{0.5}\text{Bi}_{0.5}$ )  $\text{TiO}_3$ — $\text{ANbO}_3$  (A = Na, K) Systems [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2001, 40: 5 703—5 705.
- [10] Nagata H, Koizumi N, Takenaka T. Lead—Free Piezoelectric Ceramics of ( $\text{Bi}_{1/2}\text{Na}_{1/2}$ )  $\text{TiO}_3$ — $\text{BiFeO}_3$  System [J]. Key Engineering Materials, 1999, 169—170: 37—40.
- [11] Nagata H, Takenaka T. Lead—Free Piezoelectric Ceramics of ( $\text{Bi}_{1/2}\text{Na}_{1/2}$ )  $\text{TiO}_3$ — $1/2$  ( $\text{Bi}_2\text{O}_3$ — $\text{Sc}_2\text{O}_3$ ) System [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1997, 36: 6 055—6 057.
- [12] Sakata K, Masuda Y. Ferroelectric and Antiferroelectric Properties of ( $\text{Na}_{0.5}\text{Bi}_{0.5}$ )  $\text{TiO}_3$ — $\text{SrTiO}_3$  Solid Solution Ceramics [J]. Ferroelectrics, 1974, 7: 347—349.
- [13] Herabut A, Safari A. Processing and Electromechanical Properties of ( $\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}$ )<sub>(1-1.5x)</sub> $\text{La}_x\text{TiO}_3$  Ceramics [J]. Journal of the American Ceramic Society, 1997, 80 (11): 2 954—2 958.
- [14] Lin Yuanhua, Zhao Shujin, Cai Ning, et al. Effects of Doping  $\text{Eu}_2\text{O}_3$  on the Phase Transformation and Piezoelectric Properties of  $\text{Na}_{0.5}\text{Bi}_{0.5}\text{TiO}_3$ —Based Ceramics [J]. Materials Science and Engineering, 2003, B99: 449—452.
- [15] 陈敬中. 现代晶体化学—理论与方法 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2001. 93.
- [16] Bao—Jin Chu, Da—Ren Chen, Guo—Rong Li, et al. Electrical Properties of  $\text{Na}_{1/2}\text{Bi}_{1/2}\text{TiO}_3$ — $\text{BaTiO}_3$  Ceramics [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2002, 22 (13): 2 115—2 121.
- [17] Hui—dong Li, Chu—de Feng, Wen—long Yao. Some Effects of Different Additives on Dielectric and Piezoelectric Properties of ( $\text{Bi}_{1/2}\text{Na}_{1/2}$ )  $\text{TiO}_3$ — $\text{BaTiO}_3$  Morphotropic—Phase—Boundary Composition [J]. Materials Letters, 2004, 58 (7—8): 1 194—1 198.
- [18] Xiaoxing Wang, Helen Lai—Wa Chan, Chung—loong Choy. Piezoelectric and Dielectric Properties of  $\text{CeO}_2$ —Added ( $\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}$ )<sub>0.94</sub> $\text{Ba}_{0.06}\text{TiO}_3$  Lead—Free Ceramics [J]. Solid State Communications, 2003, 125 (7—8): 395—399.
- [19] Xiaoxing Wang, Helen Lai—Wa Chan, Chung—loong Choy. ( $\text{Bi}_{1/2}\text{Na}_{1/2}$ )  $\text{TiO}_3$ — $\text{Ba}(\text{Cu}_{1/2}\text{W}_{1/2})\text{O}_3$  Lead—Free Piezoelectric Ceramics [J]. Journal of the American Ceramic Society, 2003, 86 (10): 1 809—1 811.

## Development of ( $\text{Bi}_{1/2}\text{Na}_{1/2}$ )<sub>1-x</sub> $\text{Ba}_x\text{TiO}_3$ —based Lead—Free Piezoelectric Ceramics

ZHOU Li—min, LI Kun

(Department of Materials Science and Technology, Jiangsu Polytechnic University, Changzhou 213016, China)

**Abstract:** The recent development of ( $\text{Bi}_{1/2}\text{Na}_{1/2}$ )<sub>1-x</sub> $\text{Ba}_x\text{TiO}_3$ —based lead—free piezoelectric ceramics was reviewed. Some useful methods to modify BNBT ceramics, such as nonstoichiometry of A—site or doping with different cations were described. Advantages or disadvantages and mechanism of doping with A—site cations ( $\text{La}^{3+}$ ), B—site cations ( $\text{Co}^{3+}$ ,  $\text{Nb}^{5+}$ ), or double cations ( $\text{Ce}^{3+}$  and  $\text{Ce}^{4+}$ ) were compared. And the causes of property differences were described. This review might be helpful for further study of lead—free piezoelectric ceramics.

**Key words:** BNBT; lead—free ceramics; piezoelectric ceramics