

# Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 掺杂钛酸锶钡基陶瓷介电性能 及微观形貌研究

张 晨, 徐新进, 肖佳楠

(江苏科技大学 材料科学与工程学院, 江苏 镇江 212003)

**摘 要:** 采用传统固相法制备了 Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 掺杂(Ba<sub>0.7</sub>Sr<sub>0.3</sub>)TiO<sub>3</sub> 基电容器介质陶瓷,研究了不同 Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 掺杂含量以及烧结时间对体系微观形貌及介电性能的影响.结果表明:适量 Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 掺杂有利于提高体系室温相对介电常数并降低室温介电损耗且随 Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 添加量增大,(Ba<sub>0.7</sub>Sr<sub>0.3</sub>)TiO<sub>3</sub> 基陶瓷部分晶粒异常长大.(Ba<sub>0.7</sub>Sr<sub>0.3</sub>)TiO<sub>3</sub> 基陶瓷居里温度随 Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 添加量增大向低温方向移动.随着烧结时间延长,Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 改性的(Ba<sub>0.7</sub>Sr<sub>0.3</sub>)TiO<sub>3</sub> 基陶瓷平均粒径显著增大,体系室温相对介电常数显著提高,而室温介电损耗降低.由于粒界缓冲作用减弱,(Ba<sub>0.7</sub>Sr<sub>0.3</sub>)TiO<sub>3</sub> 基陶瓷相对介电常数及介电损耗的温度稳定性随烧结时间增长有所降低.

**关键词:** 钛酸锶钡;陶瓷;介电性能;微观形貌

**中图分类号:** TM28

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-4807(2012)05-0462-05

## Dielectric properties and morphologies of Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> doped barium strontium titanate based ceramics

Zhang Chen, Xu Xinjin, Xiao Jianan

(School of Material Science and Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang Jiangsu 212003, China)

**Abstract:** The morphologies and dielectric properties of Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> doped (Ba<sub>0.7</sub>Sr<sub>0.3</sub>)TiO<sub>3</sub> ceramics for capacitor applications prepared by conventional solid state method are investigated with variation of Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> doping content and sintering time. It is revealed that suitable Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dopant is helpful to improve the relative dielectric constant and decrease the dielectric loss of (Ba<sub>0.7</sub>Sr<sub>0.3</sub>)TiO<sub>3</sub> ceramics at room temperature. As the Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> addition content increases, abnormal grain growth is found in the (Ba<sub>0.7</sub>Sr<sub>0.3</sub>)TiO<sub>3</sub> ceramics. The Curie temperature of (Ba<sub>0.7</sub>Sr<sub>0.3</sub>)TiO<sub>3</sub> ceramics shifts to lower temperature range with the increasing Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> addition content. With the increase of sintering time the average grain size and the relative dielectric constant at room temperature of Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> modified (Ba<sub>0.7</sub>Sr<sub>0.3</sub>)TiO<sub>3</sub> ceramics increases notably, while at room temperature the dielectric loss decreases with the increase of sintering time. Due to the weakened cushion of grain boundaries, the thermal stability of relative dielectric constant and dielectric loss for (Ba<sub>0.7</sub>Sr<sub>0.3</sub>)TiO<sub>3</sub> ceramics is driven worse with the increase of sintering time.

**Key words:** barium strontium titanate; ceramics; dielectric properties; morphologies

钛酸锶钡(Ba<sub>1-x</sub>Sr<sub>x</sub>TiO<sub>3</sub>,简称BST)作为BaTiO<sub>3</sub>与SrTiO<sub>3</sub>的无限固溶体,兼顾了BaTiO<sub>3</sub>高介电性与SrTiO<sub>3</sub>低损耗性的特点<sup>[1]</sup>,逐渐成为钙钛矿型铁电陶瓷材料的研究热点之一.但是,BST陶瓷在铁电-顺电相变过程中,其居里温度附近介电常数随温度变化剧烈,居里温区狭窄,导致元器件

不能稳定工作,精度和可靠性降低<sup>[2]</sup>.

为了满足不同应用领域的需要,各类等价及不等价离子对钛酸锶钡的改性研究应运而生<sup>[3-6]</sup>.由于稀土元素氧化物可抑制BaTiO<sub>3</sub>陶瓷的晶粒生长,提高室温介电常数,降低容温变化率,提高耐压强度以及抗还原型介电材料的寿命<sup>[7]</sup>,因此稀土

元素氧化物对 BST 陶瓷介电性能的影响亦备受瞩目. 文献[8]研究了 Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 对 (Ba, Sr)TiO<sub>3</sub> 电容器陶瓷介电性能的影响, 发现随着 Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 添加量的增大, 介电损耗逐渐减小, 通过组成调整介电常数可达 5 245, 介电损耗仅为 0.002 6. 根据文献[9]针对 Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 掺杂 (Ba<sub>0.68</sub>Sr<sub>0.32</sub>)TiO<sub>3</sub> 陶瓷介电性能的研究, 发现 Sm<sup>3+</sup> 离子在 BST 钙钛矿结构中的取代特性随添加量的增加发生转变, 0.1 mol% Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 掺杂的 BST 陶瓷介电常数可达 5 000 以上, 介电损耗通过增大 Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 添加量而降至 0.007.

此外, 烧结工艺的优化对 BST 基介电陶瓷性能的提高亦起到至关重要的作用<sup>[10]</sup>. 文献[11]在探讨烧结对 (Ba<sub>0.8</sub>Sr<sub>0.2</sub>)TiO<sub>3</sub> 陶瓷介电性能影响时发现, 适当的烧结条件尤其是保温时间可提高其介电常数及剩余极化强度.

本文以稀土元素氧化物 Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为改性剂, 通过传统固相法制备 0% ~ 1.0% Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 掺杂的 (Ba<sub>0.7</sub>Sr<sub>0.3</sub>)TiO<sub>3</sub> 基电容器介质陶瓷, 系统研究了 Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量以及烧结保温时间对其介电性能及微观形貌的影响.

## 1 实验

### 1.1 原料的制备

采用传统固相法陶瓷制备工艺, 以 BaCO<sub>3</sub> (分析纯, >99.0%), SrCO<sub>3</sub> (分析纯, >99.0%), TiO<sub>2</sub> (化学纯, >98.0%), Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (高纯, >99.9%) 为主要原料. 根据分子式 (Ba<sub>0.7</sub>Sr<sub>0.3</sub>)TiO<sub>3</sub> 将起始原料 BaCO<sub>3</sub>、SrCO<sub>3</sub> 以及 TiO<sub>2</sub> 按比例混合, 置于 Φ13 cm 的玛瑙研钵中干法研磨 1 h, 所得粉体在 1 080℃ 保温 2 h 预合成, 随炉冷却后加入 0.2% MgO (分析纯, >98.5%)、0.2% MnO<sub>2</sub> (分析纯, >97.5%)、0.2% ZnO (分析纯, >99.0%) 以及 0% ~ 1.0% Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 二次研磨 1 h 后加入 5% 的聚乙烯醇 (PVA) 造粒, 在 250 MPa 下压成直径为 10 mm 的坯体, 各试样经 200℃ 排胶 20 min, 在 1 320℃ 下烧结 0.5, 2 及 5 h 后制得介电陶瓷. 烧成的试样经超声波清洗后, 涂覆 BQ-5311 表面银浆在 800℃ 下烧银 10 min.

### 1.2 测试方法

室温下各试样的电容量  $C$  和损耗因子  $D$  采用台湾固纬 LCR-8101G 高精度 LCR 测试仪在 1 kHz 下进行测试, 体系的介电温谱则由该 LCR 测试仪结合 THP-F-100 智能温度控制系统在 1 kHz 下测得. 试样的相对介电常数  $\epsilon_r$  及介电损耗  $\tan\delta$  分别为

$$\epsilon_r = \frac{14.4Ch}{\Phi^2} \quad (1)$$

$$\tan\delta = \frac{fD}{1000} \quad (2)$$

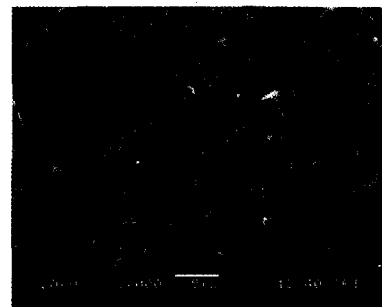
式中:  $C$  为试样的电容量 (pF);  $h$  为试样的厚度 (cm);  $\Phi$  为试样的电极直径 (cm);  $D$  为试样的损耗因子;  $f$  为测试频率 (Hz).

采用日本电子 JSM-6480 型扫描电子显微镜对各超声波清洗后的陶瓷试样进行表面微观形貌观察.

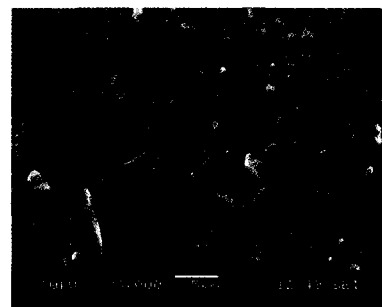
## 2 结果与讨论

### 2.1 Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 对 (Ba<sub>0.7</sub>Sr<sub>0.3</sub>)TiO<sub>3</sub> 基陶瓷微观形貌的影响

在 1 320℃ 下烧结 2 h 后 Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 掺杂 (Ba<sub>0.7</sub>Sr<sub>0.3</sub>)TiO<sub>3</sub> 基陶瓷的表面微观形貌见图 1. 各 Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 掺杂量下陶瓷试样晶粒轮廓清晰, 烧结致密. 当 Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 添加量较大时, (Ba<sub>0.7</sub>Sr<sub>0.3</sub>)TiO<sub>3</sub> 基陶瓷部分晶粒出现异常长大, 粒径呈现不均匀分布.



a) 0% Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>



b) 1.0% Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

图 1 Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 掺杂 (Ba<sub>0.7</sub>Sr<sub>0.3</sub>)TiO<sub>3</sub> 基陶瓷表面微观形貌  
Fig. 1 Surface morphologies of Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> doped (Ba<sub>0.7</sub>Sr<sub>0.3</sub>)TiO<sub>3</sub> ceramics

### 2.2 Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 对 (Ba<sub>0.7</sub>Sr<sub>0.3</sub>)TiO<sub>3</sub> 基陶瓷介电性能的影响

1 kHz 下经 1 320℃ 烧结 2 h 后各 Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 掺杂 (Ba<sub>0.7</sub>Sr<sub>0.3</sub>)TiO<sub>3</sub> 基陶瓷室温介电性能见表 1. 该陶瓷体系的室温相对介电常数以及介电损耗均随 Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 掺杂量的增加发生显著变化. 在 0% ~

1.0%  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  添加范围内,  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  掺杂量的增加有利于  $(\text{Ba}_{0.7}\text{Sr}_{0.3})\text{TiO}_3$  基陶瓷室温相对介电常数的提高. 另外, 适量添加  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  还可有效降低  $(\text{Ba}_{0.7}\text{Sr}_{0.3})\text{TiO}_3$  体系室温介电损耗, 使其低于  $2 \times 10^{-3}$ .

表 1  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  掺杂  $(\text{Ba}_{0.7}\text{Sr}_{0.3})\text{TiO}_3$  基陶瓷室温介电性能  
Table 1 Dielectric properties of  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  doped  $(\text{Ba}_{0.7}\text{Sr}_{0.3})\text{TiO}_3$  ceramics at room temperature

$w/\%$	$\epsilon_r$	$\tan \delta$
0	5 830	0.002 52
0.4	6 410	0.002 66
1.0	6 740	0.001 86

经  $1\ 320^\circ\text{C}$  烧结 2 h 后各  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  掺杂  $(\text{Ba}_{0.7}\text{Sr}_{0.3})\text{TiO}_3$  基陶瓷试样在 1 kHz 下相对介电常数以及介电损耗随温度变化曲线见图 2.

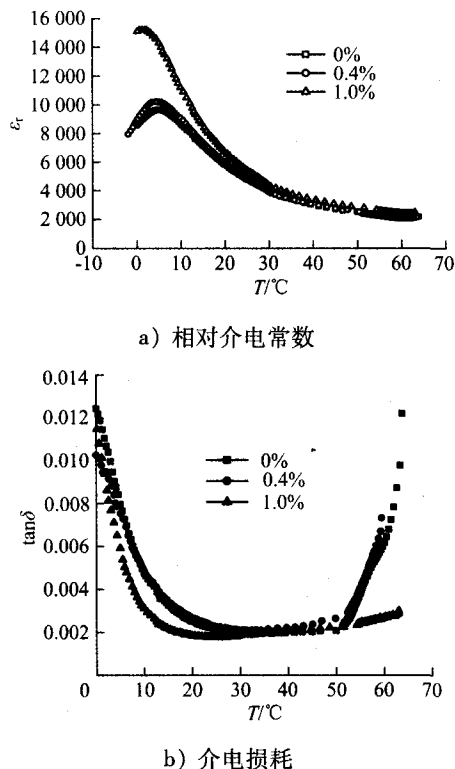


图 2  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  掺杂  $(\text{Ba}_{0.7}\text{Sr}_{0.3})\text{TiO}_3$  基陶瓷相对介电常数以及介电损耗随温度变化曲线

Fig. 2 Temperature dependence of relative dielectric constant and dielectric loss of  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  doped  $(\text{Ba}_{0.7}\text{Sr}_{0.3})\text{TiO}_3$  ceramics

在测试温度范围内, 体系相对介电常数随温度升高出现居里峰, 而介电损耗随温度升高先减小而后逐渐增大. 未掺杂  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  的  $(\text{Ba}_{0.7}\text{Sr}_{0.3})\text{TiO}_3$  空白试样居里温度  $T_c$  为  $6^\circ\text{C}$ ; 随着  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  掺杂量增大, 居里温度  $T_c$  略向负温方向移动; 当  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  为 1.0% 时, 居里温度  $T_c$  降至  $1^\circ\text{C}$ . 由此可知,  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  掺杂对  $(\text{Ba}_{0.7}\text{Sr}_{0.3})\text{TiO}_3$  体系具有一定的居里峰移

动效应. 这可归因于  $\text{Nd}^{3+}$  离子半径 (0.098 nm, 配位数  $\text{CN} = 6$ ) 大于  $\text{Ti}^{4+}$  离子半径 (0.061 nm, 配位数  $\text{CN} = 6$ ), 而小于  $\text{Ba}^{2+}$  离子半径 (0.161 nm, 配位数  $\text{CN} = 12$ ) 及  $\text{Sr}^{2+}$  离子半径 (0.144 nm, 配位数  $\text{CN} = 12$ ), 当  $\text{Nd}^{3+}$  离子进入钛酸锶钡钙钛矿晶格会使部分晶胞呈现出中心对称, 使整体的畴结构遭到破坏, 进而表现出居里温度  $T_c$  的前移. 另外, 掺杂  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  后,  $(\text{Ba}_{0.7}\text{Sr}_{0.3})\text{TiO}_3$  基陶瓷的相对介电常数随温度变化仍十分显著, 温谱尖锐陡峭, 居里峰附近相对介电常数高达 10 000 以上.

### 2.3 烧结时间对 $(\text{Ba}_{0.7}\text{Sr}_{0.3})\text{TiO}_3$ 基陶瓷微观形貌的影响

经不同保温时间烧结后 0.4%  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  掺杂  $(\text{Ba}_{0.7}\text{Sr}_{0.3})\text{TiO}_3$  基陶瓷的表面微观形貌见图 3. 各保温时间下  $(\text{Ba}_{0.7}\text{Sr}_{0.3})\text{TiO}_3$  基陶瓷烧结致密, 粒径分布较均匀. 随着保温时间的延长, 晶粒发育逐渐完全, 平均粒径显著增大. 保温时间为 0.5 h 时晶粒平均尺寸仅约  $1.5\ \mu\text{m}$ ; 保温时间为 5 h 时, 0.4%  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  掺杂  $(\text{Ba}_{0.7}\text{Sr}_{0.3})\text{TiO}_3$  基陶瓷晶粒的形状规则且部分晶粒尺寸增大至数微米甚至几十微米.

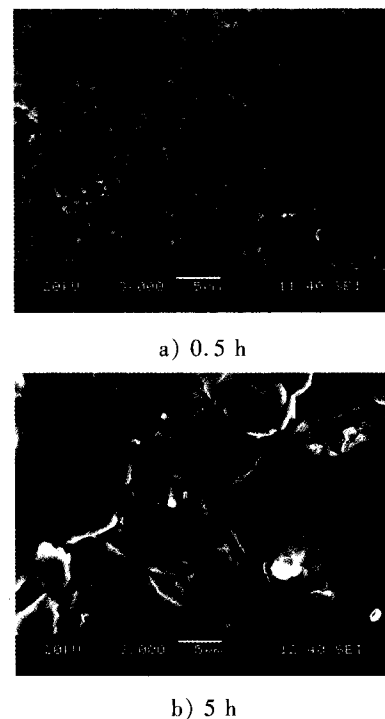


图 3 不同保温时间  $(\text{Ba}_{0.7}\text{Sr}_{0.3})\text{TiO}_3$  基陶瓷表面微观形貌

Fig. 3 Surface morphologies of  $(\text{Ba}_{0.7}\text{Sr}_{0.3})\text{TiO}_3$  based ceramics sintered for different time

### 2.4 烧结时间对 $(\text{Ba}_{0.7}\text{Sr}_{0.3})\text{TiO}_3$ 基陶瓷介电性能的影响

经不同保温时间烧结后 0.4%  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  掺杂  $(\text{Ba}_{0.7}\text{Sr}_{0.3})\text{TiO}_3$  基陶瓷在 1 kHz 下的室温相对介

电常数以及介电损耗见表2. 随着保温时间的增长,试样的室温相对介电常数显著增大,而室温介电损耗则有所减小. 在1 kHz下,经1 320 °C烧结5 h后0.4% Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 掺杂(Ba<sub>0.7</sub>Sr<sub>0.3</sub>)TiO<sub>3</sub> 基陶瓷试样室温相对介电常数可达7 500以上,而介电损耗仅约为2 × 10<sup>-3</sup>. 综上所述,Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 掺杂(Ba<sub>0.7</sub>Sr<sub>0.3</sub>)TiO<sub>3</sub> 基陶瓷要获得优良的室温介电性能即高温相对介电常数以及低介电损耗,则须在该介电陶瓷烧结过程中维持较长的保温时间.

表2 不同保温时间(Ba<sub>0.7</sub>Sr<sub>0.3</sub>)TiO<sub>3</sub> 基陶瓷室温介电性能  
Table 2 Dielectric properties of (Ba<sub>0.7</sub>Sr<sub>0.3</sub>)TiO<sub>3</sub> based ceramics sintered for different time at room temperature

t/h	$\epsilon_r$	$\tan \delta$
0.5	2 910	0.005 11
2	6 410	0.002 66
5	7 530	0.002 06

在1 kHz下经不同保温时间所得0.4% Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 掺杂(Ba<sub>0.7</sub>Sr<sub>0.3</sub>)TiO<sub>3</sub> 基陶瓷相对介电常数随温度变化曲线见图4. 在0~60 °C温区内,随测试温度升高,保温0.5 h的(Ba<sub>0.7</sub>Sr<sub>0.3</sub>)TiO<sub>3</sub> 基陶瓷试样相对介电常数逐渐降低. 延长保温时间后(Ba<sub>0.7</sub>Sr<sub>0.3</sub>)TiO<sub>3</sub> 基陶瓷相对介电常数随温度升高出现居里峰,保温2 h试样的相对介电常数最大值约为10 200,而保温5 h试样的相对介电常数最大值可达12 800. 另外,在整个测试温区内各温度下试样相对介电常数均随保温时间延长而增大. 由图4可知,Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 掺杂(Ba<sub>0.7</sub>Sr<sub>0.3</sub>)TiO<sub>3</sub> 基陶瓷相对介电常数的温度稳定性随烧结时间增长有所降低. 这与(Ba<sub>0.7</sub>Sr<sub>0.3</sub>)TiO<sub>3</sub> 基介电陶瓷多晶结构中晶粒间界的缓冲作用密切相关,这种缓冲作用的大小及其有效程度又与陶瓷晶粒的大小直接关联. 保温时间

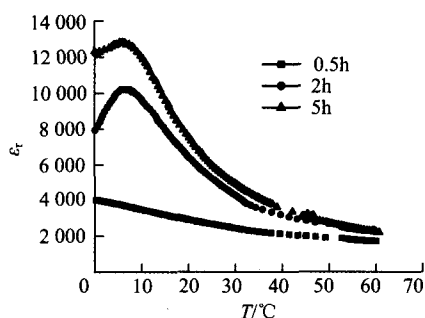


图4 不同保温时间(Ba<sub>0.7</sub>Sr<sub>0.3</sub>)TiO<sub>3</sub> 基陶瓷相对介电常数随温度变化曲线

Fig. 4 Temperature dependence of relative dielectric constant for (Ba<sub>0.7</sub>Sr<sub>0.3</sub>)TiO<sub>3</sub> based ceramics sintered for different time

延长,Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 掺杂(Ba<sub>0.7</sub>Sr<sub>0.3</sub>)TiO<sub>3</sub> 基陶瓷平均粒径增大(图3),由微粒化引起的粒界缓冲作用减弱,介电温谱逐渐陡峭,温度稳定性降低.

在1 kHz下经不同保温时间所得0.4% Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 掺杂(Ba<sub>0.7</sub>Sr<sub>0.3</sub>)TiO<sub>3</sub> 基陶瓷介电损耗随温度变化曲线见图5. 随着测试温度升高,(Ba<sub>0.7</sub>Sr<sub>0.3</sub>)TiO<sub>3</sub> 基陶瓷试样介电损耗先减小进而逐渐反弹. 在0~6 °C温区内,各温度下试样的介电损耗都随保温时间延长而增大. 而在室温以上高温区内,增长烧结时间有助于试样介电损耗的降低. 此外,Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 掺杂(Ba<sub>0.7</sub>Sr<sub>0.3</sub>)TiO<sub>3</sub> 基陶瓷介电损耗的温度稳定性亦随烧结时间增长有所降低.

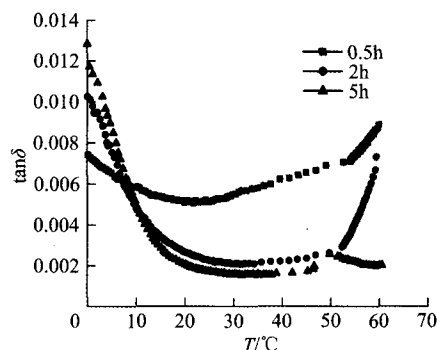


图5 不同保温时间(Ba<sub>0.7</sub>Sr<sub>0.3</sub>)TiO<sub>3</sub> 基陶瓷介电损耗随温度变化曲线

Fig. 5 Temperature dependence of dielectric loss for (Ba<sub>0.7</sub>Sr<sub>0.3</sub>)TiO<sub>3</sub> based ceramics sintered for different time

### 3 结论

随Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 添加量增大,(Ba<sub>0.7</sub>Sr<sub>0.3</sub>)TiO<sub>3</sub> 基陶瓷部分晶粒异常长大. 适量Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 掺杂可提高体系室温相对介电常数并降低室温介电损耗. 另外,(Ba<sub>0.7</sub>Sr<sub>0.3</sub>)TiO<sub>3</sub> 基陶瓷居里温度随Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 添加量增大向负温方向移动,但Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 改性后体系相对介电常数随温度变化仍十分显著. 随着烧结时间延长,Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 改性的(Ba<sub>0.7</sub>Sr<sub>0.3</sub>)TiO<sub>3</sub> 基陶瓷晶粒发育逐渐完全,平均粒径显著增大,体系室温相对介电常数显著提高,而室温介电损耗降低. 随烧结时间增长,Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 掺杂的(Ba<sub>0.7</sub>Sr<sub>0.3</sub>)TiO<sub>3</sub> 基介电陶瓷粒界缓冲作用减弱,体系相对介电常数及介电损耗温度稳定性降低.

### 参考文献 (References)

- [1] 王平,吴思华,李之锋,等. 钛酸锶钡基高压陶瓷电容器材料的研究[J]. 硅酸盐通报,2009, 28(2): 336 - 340.

- Wang Ping, Wu Sihua, Li Zhifeng, et al. Study on the  $Ba_{1-x}Sr_xTiO_3$ -based high voltage ceramic capacitor materials [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2009, 28(2):336-340. (in Chinese)
- [2] 程华容,朱景川,全在昊,等. 烧结工艺对  $B_2O_3$  掺杂  $Ba_{1-x}Sr_xTiO_3$  梯度陶瓷介电性能的影响[J]. 无机材料学报,2005,20(5):1145-1152.  
Cheng Huarong, Zhu Jingchuan, Jeon Jaeho, et al. Effect of sintering process on dielectric properties of  $B_2O_3$ -doped  $Ba_{1-x}Sr_xTiO_3$  graded ceramics[J]. *Journal of Inorganic Materials*, 2005,20(5):1145-1152. (in Chinese)
- [3] Kang D S, Han M S, Lee S G, et al. Dielectric and pyroelectric properties of barium strontium calcium titanate ceramics [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2003, 23(3): 515-518.
- [4] 张磊,梁辉,徐廷献,等. 钛酸锶钡电介质材料的掺杂改性及其应用[J]. 硅酸盐学报,2002,30(6):785-788.  
Zhang Lei, Liang Hui, Xu Tingxian, et al. Doping modification and application of  $Ba_{1-x}Sr_xTiO_3$  dielectrics [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2002, 30(6): 785-788. (in Chinese)
- [5] Shen Cai, Liu Qian, Liu Qingfeng. Photoluminescence properties of  $Er^{3+}$ -doped  $Ba_{0.5}Sr_{0.5}TiO_3$  prepared by Sol-Gel synthesis[J]. *Materials Science and Engineering B*, 2004, 111(1): 31-35.
- [6] Liu S J, Zenou V Y, Sus I, et al. Structure-dielectric property relationship for vanadium-and scandium-doped barium strontium titanate [J]. *Acta Materialia*, 2007, 55(8):2647-2657.
- [7] 郭炜,李玲霞,吴霞宛,等. 掺杂稀土元素对细晶  $BaTiO_3$  系统耐压及介电性能的影响[J]. 中国稀土学报,2003,21(2):209-213.  
Guo Wei, Li Lingxia, Wu Xiawan, et al. Effect of doping rare-earth element on pressurization and dielectric properties of fine-grain  $BaTiO_3$  ceramics[J]. *Journal of the Chinese Rare Earth Society*, 2003, 21(2):209-213. (in Chinese)
- [8] Huang Xinyou, Gao Chunhua, Chen Xiangchong, et al. Dielectric properties of  $Dy_2O_3$ -doped  $(Ba,Sr)TiO_3$  ceramics [J]. *Journal of Rare Earths*, 2004, 22(z3): 226-228.
- [9] Li Yuanliang, Qu Yuanfang. Dielectric properties and substitution mechanism of samarium-doped  $Ba_{0.68}Sr_{0.32}TiO_3$  ceramics [J]. *Materials Research Bulletin*, 2009,44(1):82-85.
- [10] 杨文,常爱民,杨邦朝. 晶粒尺寸对  $Ba_{0.80}Sr_{0.20}TiO_3$  陶瓷介电铁电特性的影响 [J]. 硅酸盐学报,2002,30(3):390-392,397.  
Yang Wen, Chang Aimin, Yang Banchao. Effect of grain size on dielectric and ferroelectric properties of  $Ba_{0.80}Sr_{0.20}TiO_3$  ceramics [J]. *Journal of The Chinese Ceramic Society*, 2002,30(3):390-392,397. (in Chinese)
- [11] Szymczak L, Ujma Z, Hańderek J, et al. Sintering effects on dielectric properties of  $(Ba,Sr)TiO_3$  ceramics [J]. *Ceramics International*, 2004, 30(6): 1003-1008.

(责任编辑: 缪文桦)