

Nd₂O₃ 掺杂 (Sr_{0.9}Ba_{0.1})La₄Ti₄O₁₅ 陶瓷的结构及微波性能

王利, 高峰, 张大帅, 王敏, 秦梦婕

(西北工业大学凝固技术国家重点实验室, 陕西 西安 710072)

摘要:采用传统的固相反应法制备 (Sr_{0.9}Ba_{0.1})La₄Ti₄O₁₅ + $x\%$ Nd₂O₃ (质量分数 $0 \leq x \leq 8$, BSN) 系微波介质陶瓷, 并对其物相组成、晶体结构及微波介电性能进行分析。研究表明, Nd₂O₃ 含量的增加降低了 BSN 陶瓷的烧结温度, 陶瓷的主晶相为 SrLa₄Ti₄O₁₅ 相, 并伴随有少量第二相 La₂TiO₅ 的生成。在微波频率下, 随着 Nd₂O₃ 含量的增加, BSN 陶瓷的介电常数及谐振频率温度系数变化小, 品质因数与频率之积 ($Q \times f$) 值提高, 优化出掺杂 4% Nd₂O₃ 的 (Sr_{0.9}Ba_{0.1})La₄Ti₄O₁₅ 陶瓷具有最佳微波介电性能: $\epsilon_r = 43.2$, $Q \times f = 42\ 015\ \text{GHz}(6.024\ \text{GHz})$, $\tau_f = -9.6\ \mu\text{C}^{-1}$ 。

关键词: (Sr_{0.9}Ba_{0.1})La₄Ti₄O₁₅; Nd₂O₃; 微波介质陶瓷; 掺杂; 显微结构; 介电性能

中图分类号: TN61; TQ174.75 **文献标识码:** A

Microstructure and Microwave Properties of Nd₂O₃-doped (Sr_{0.9}Ba_{0.1})La₄Ti₄O₁₅ Ceramics

WANG Li, GAO Feng, ZHANG Dashuai, WANG Ming, QIN Mengjie

(State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: (Sr_{0.9}Ba_{0.1})La₄Ti₄O₁₅ + $x\text{wt}\%$ Nd₂O₃ ($0 \leq x \leq 8$, BSN) ceramics were prepared by the conventional solid state processing method, the microstructure and microwave dielectric properties of BSN ceramics were investigated. The results show that adding Nd₂O₃ into BSN ceramics would lower the sintering temperature, a few of La₂TiO₅ phase was also observed in the ceramics besides SrLa₄Ti₄O₁₅. With increasing the content of Nd₂O₃, the dielectric constant and the temperature coefficient of resonance frequency changed little, but the value of $Q \times f$ increases obviously. (Sr_{0.9}Ba_{0.1})La₄Ti₄O₁₅ + 4% Nd₂O₃ ceramic shows the optimal dielectric properties of $\epsilon_r = 43.2$, $Q \times f = 42\ 015\ \text{GHz}(6.024\ \text{GHz})$, $\tau_f = -9.6\ \mu\text{C}^{-1}$.

Key words: (Sr_{0.9}Ba_{0.1})La₄Ti₄O₁₅; Nd₂O₃; microwave dielectric ceramics; doping; microstructure; dielectric properties

0 引言

在过去的几十年里,随着移动通信的工作频率延伸到微波频段,具有高介电常数(ϵ_r)、高品质因数($Q \times f$)和近零的谐振频率温度系数(τ_f)的微波介质陶瓷成为研究热点^[1-3]。近年来,类钙钛矿结构的微波介质陶瓷 BaLa₄Ti₄O₁₅ (BLT)和 SrLa₄Ti₄O₁₅ (SLT)因具有良好的微波介电性能而引起了学者们的极大兴趣。C. Vineis等^[4]首次报道了 BLT 的微波介电性能; I. N. Jawahar等^[5]研究了 MO-La₂O₃-TiO₂ (M=Ca, Sr, Ba)系微波介质陶瓷,结果表明 SLT 具有最佳的微波介电性能; H. Ohsato

等^[6]详细研究了 Ba_nLa₄Ti_{3+n}O_{12+3n}系微波介质陶瓷,发现当 $n=1$ 时(BLT)具有最佳微波介电性能: $\epsilon_r = 46$, $Q \times f = 46\ 000\ \text{GHz}$, $\tau_f = -11\ \mu\text{C}^{-1}$; Y. Tohdo等^[7]研究了 ALa₄Ti₄O₁₅ (A=Ba, Sr, Ca)系微波介质陶瓷的晶体结构与微波性能的关系,发现 BLT 具有最大的介电常数(44.4), SLT 具有最佳的谐振频率温度系数($-8.4\ \mu\text{C}^{-1}$); H. Zheng等^[8]单独研究了 BLT 陶瓷的微波介电性能与晶体结构、显微组织结构的关系,通过调节烧结工艺,得到了较好的微波介电性能: $\epsilon_r = 45$, $Q \times f = 44\ 000\ \text{GHz}$, $\tau_f = -2\ \mu\text{C}^{-1}$; Y. Fukami等^[9]研究了模板籽晶的

收稿日期:2016-04-014

基金项目:陕西省科学技术研究发展计划基金资助项目(2014K08-10);航空科学基金资助项目(20140853013)

作者简介:王利(1991-),男,河南信阳人,硕士生,主要从事微波介质陶瓷制备与性能的研究。通信作者:高峰(1976-),男,教授,博导。

加入量对 BLT 微波性能的影响,发现随模板籽晶加入量的增大,介电常数和谐振频率温度系数提高,而品质因数却与之前 H. Ohsato, Y. Tohdo 等报道的一样。由此可见, BLT 相对于 SLT 而言具有较高的介电常数,而 SLT 相对于 BLT 而言具有更接近于 0 的谐振频率温度系数。然而,两者的烧结温度偏高、保温时间过长等问题则提高了其实际应用的成本。为了得到性能更优异的微波介质陶瓷,可以通过掺杂的方法使性能得到进一步提高。在钙钛矿和类钙钛矿结构中,不同 A、B 位阳离子的取代或掺杂是材料改性的一种重要方式。由于 A 位阳离子 (Ba^{2+} , Sr^{2+} , La^{3+}) 具有大的离子极化率,有利于获得高的介电常数。另外, A、B 位均可能被电价和半径不同的阳离子在较宽的范围内取代,其介电性能有较大范围内调节与优化的可能性,如一些学者通过将 BLT 和 SLT 进行复合改变了 A 位阳离子的极化率,制备出微波介电性能良好、烧结温度较低的 $(\text{Ba}_{1-x}\text{Sr}_x)\text{La}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ (BSLT) 系微波介质陶瓷^[10-13]。目前对该体系 La^{3+} 取代掺杂改性方面的研究较少, A 位不同位置的改性机理还尚不明确。Nd 和 La 均属于稀土元素, Nd_2O_3 和 La_2O_3 的熔点相近, Nd^{3+} 和 La^{3+} 的离子半径相近, 文献^[14]报道了 Nd^{3+} 取代 $\text{CaLa}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ 中的 La^{3+} 改善了频率温度系数和介电性能。而关于在 $(\text{Sr}_{0.9}\text{Ba}_{0.1})\text{La}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ 陶瓷中掺杂 Nd_2O_3 的研究还未见报道。因此, 本文通过调节 Nd^{3+} 在 $(\text{Sr}_{0.9}\text{Ba}_{0.1})\text{La}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ 基体中的掺杂量, 探索 Nd^{3+} 含量对 $(\text{Sr}_{0.9}\text{Ba}_{0.1})\text{La}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ 陶瓷的显微组织和微波介电性能的影响规律, 优化出具有最佳微波性能的 Nd_2O_3 掺杂量。

1 实验

1.1 样品制备

以分析纯的 SrCO_3 、 TiO_2 、 La_2O_3 、 BaCO_3 和 Nd_2O_3 为原料, 采用传统电子陶瓷工艺制备陶瓷, 材料组成为 $(\text{Sr}_{0.9}\text{Ba}_{0.1})\text{La}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15} + x\% \text{Nd}_2\text{O}_3$, 质量分数 $x=0, 2, 4, 8$, 依次编号为 BSN1# ~ BSN4#。首先用 BaCO_3 、 SrCO_3 、 TiO_2 、 La_2O_3 按 $\text{BaLa}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ (BLT) 和 $\text{SrLa}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ (SLT) 化学计量比分别配料, 在乙醇介质中球磨 12 h (ZrO_2 磨球), 出料、烘干, BLT、SLT 粉料分别在 $1\ 300\ ^\circ\text{C}$ 、 $1\ 250\ ^\circ\text{C}$ 预烧 4 h, 得到 BLT 和 SLT 预烧粉体; 然后将 BLT 预烧粉、SLT 预烧粉、 Nd_2O_3 , 按 $(\text{Sr}_{0.9}\text{Ba}_{0.1})\text{La}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15} + x\%$

Nd_2O_3 化学计量比称量, 将称量好的粉料置于 ZrO_2 球磨罐中, 加入与粉料等质量的无水乙醇, 在球磨机上球磨 12 h, 出料、烘干、造粒后在 100 MPa 压制成 $\varnothing 12\ \text{mm} \times 1\ \text{mm}$ 的圆片和 $\varnothing 12\ \text{mm} \times 6\ \text{mm}$ 的圆柱。压好的试样在 $500\ ^\circ\text{C}$ 下除去粘结剂, 然后在 $1\ 550 \sim 1\ 600\ ^\circ\text{C}$ 保温 4 h 烧结成瓷。

1.2 样品表征

采用 Archimedes 排水法测试样品密度; 采用 X'Pert MPB PRO 型 X 线衍射仪 (XRD) 分析材料的物相组成; 采用 ZeissSupra55 型扫描电子显微镜 (SEM) 分析样品表面形貌和成分; 采用 E8363B 型网络分析仪用闭式谐振腔法测试样品在微波频段下的介电性能, 用下式计算谐振频率温度系数:

$$\tau_f = \frac{1}{f} \frac{df}{dt} = \frac{f_{02} - f_{01}}{f_{01}(T_2 - T_1)} \quad (1)$$

式中 f_{01} , f_{02} 分别是温度为 T_1 , T_2 时的谐振频率, 本文测试温度范围为 $25 \sim 85\ ^\circ\text{C}$ 。

2 结果与讨论

2.1 BSN 陶瓷的烧结特性与显微结构

图 1 为 BSN1# ~ 4# 陶瓷的 XRD 衍射图谱。由图可见, 各组分的主晶相为 $\text{BaLa}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ 和 $\text{SrLa}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ 的固溶体 $(\text{Ba}, \text{Sr})\text{La}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ 相, 同时伴随有少量第二相 La_2TiO_5 生成, 但未发现含有 Nd 的新相生成, 随着 Nd_2O_3 掺杂量的增加, La_2TiO_5 的峰强度逐渐减弱。

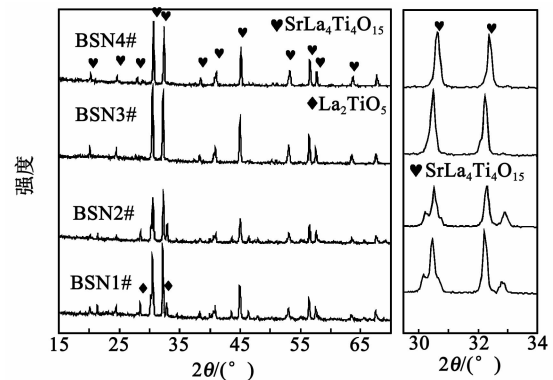


图 1 $(\text{Sr}_{0.9}\text{Ba}_{0.1})\text{La}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15} - x\% \text{Nd}_2\text{O}_3$ 陶瓷的 XRD 图谱

此外, 随着 Nd^{3+} 含量的增多, (103) 和 (110) 晶面衍射峰均向大角度方向移动 (图 1(b) 中可观察到角度移动), 这是由于 $(\text{Sr}_{0.9}\text{Ba}_{0.1})\text{La}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ 是六方类钙钛矿结构, Nd^{3+} 、 La^{3+} 的离子半径分别为 $0.127\ \text{nm}$ 、 $0.136\ \text{nm}$, 两者的半径相近, 可以形成固溶体。根据容差因子^[15]计算可知, 二者固溶能够形

成稳定的钙钛矿结构。因此,根据布喇格方程可知,只有 Nd^{3+} 取代 La^{3+} 时,引起六边形晶格堆垛的 AO_3 密排层在 a 和 c 方向上发生微小的收缩,衍射峰才能向大角度方向偏移。这说明 Nd^{3+} 取代的是 La^{3+} 的位置,形成了连续的固溶体。

图2为BSN微波介质陶瓷在不同烧结温度下密度的变化情况。由图可看出,各组分陶瓷的密度均随烧结温度的升高呈现先升高再降低的趋势。其中BSN1#和BSN2#在1580℃下烧结成瓷性最好,而BSN3#和BSN4#在1500℃下烧结成瓷性最好。

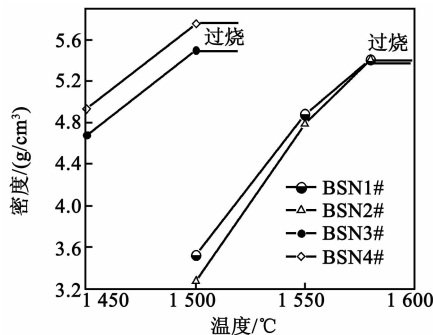


图2 不同烧结温度下BSN1#-4#陶瓷的密度

图3为BSN1#~4#在1500℃下烧结的密度随着 Nd_2O_3 掺杂量的变化曲线。由图可见,随着 Nd_2O_3 掺杂量的增加,陶瓷的密度增加,成瓷性越好。结果表明,掺杂 Nd_2O_3 能够降低基体组分 $(\text{Sr}_{0.9}\text{Ba}_{0.1})\text{La}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ 的烧结温度。

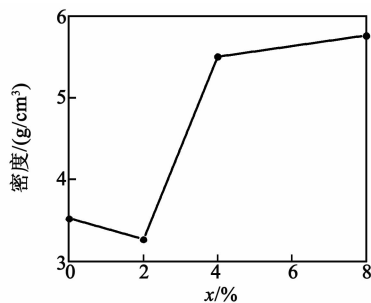


图3 1500℃烧结后BSN陶瓷的密度

图4为BSN1#~4#烧结陶瓷样品经抛光热腐蚀后的SEM图像。由图可看出,经热腐蚀后的样品由棒状和块状晶粒组成,气孔较少,结构致密,其中有的组分可以明显看到生长台阶,而不同组分的样品,其块状和棒状晶粒含量不同,不同形貌的晶粒交互排列;随着 Nd_2O_3 添加量的增多,晶粒尺寸先增大后减小,陶瓷气孔先增多后减小,这与密度的变化相符。其中BSN2#的晶粒尺寸相对较大,且大晶粒的比例远高于小晶粒;BSN3#~4#的晶粒

尺寸相对较小,这是由于 Nd_2O_3 的添加抑制了晶粒的生长。

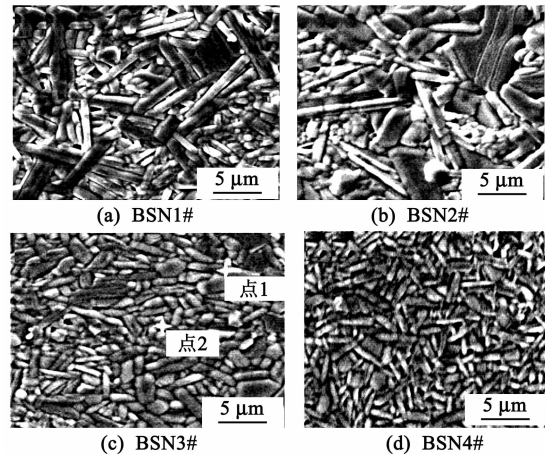


图4 BSN1#-4#陶瓷样品的SEM图像

对BSN3#中不同形貌的晶粒做EDS分析,结果如表1所示。点1区域对应的棒状晶粒,主要元素为氧(O)、钛(Ti)、锶(Sr)、钡(Ba)和镧(La),原子数比也基本与 $(\text{Sr}_{0.9}\text{Ba}_{0.1})\text{La}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ 保持一致;与之相比,点2区域对应的小晶粒则多出了添加的Nd, XRD中也未检测到含Nd的第二相,说明添加的 Nd_2O_3 进入了 $(\text{Sr}_{0.9}\text{Ba}_{0.1})\text{La}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ 中。 Nd^{3+} 和 La^{3+} 原子总含量与 Ti^{4+} 的相近,说明 Nd^{3+} 取代了与其半径相近的 La^{3+} 。

表1 BSN3#微波介质陶瓷晶粒的EDS分析

元素	原子数分数/%	
	点1	点2
O	56.49	63.15
Ti	19.86	15.58
Sr	4.81	4.53
Ba	0.42	0.72
La	18.43	14.20
Nd	—	1.81

2.2 BSLT陶瓷的微波介电性能

图5是BSN1#~4#的微波 ϵ_r 和 $Q \times f$ 随 Nd_2O_3 添加量的变化。由图可见,随着 Nd_2O_3 添加量的增加, ϵ_r 有微小的下降趋势, $Q \times f$ 则有较大的提升,其中 Nd_2O_3 添加量为4%时达到最大值,相对于未添加 Nd_2O_3 的BSN1#提升了10000以上。整体来看,BSN陶瓷材料在微波下 $Q \times f$ 值随着 Nd_2O_3 掺杂量的增大而增大, $Q \times f = 29\,793 \sim 42\,015$ GHz。

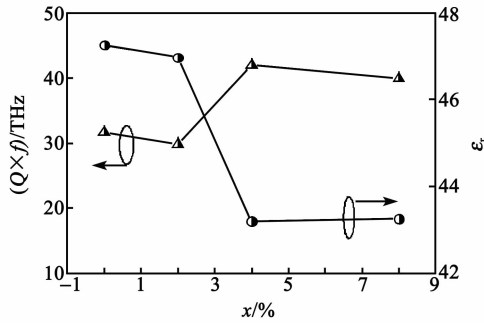


图 5 BSN1# ~ 4# 陶瓷的介电常数与品质因数

一般认为,材料在微波频率下的损耗可分为两类:

1) 内在的损耗也称本征损耗,它主要受晶格振动模式控制。

2) 外在的损耗,主要受杂质第二相、氧空位、晶粒尺寸及致密度的影响。

测试结果显示,ε_r 随 Nd³⁺ 含量的增加有微小的下降,原因是随着 Nd³⁺ 不断取代 La³⁺,使得六边形堆垛 AO₃ 密排层间距不断减小,这不利于阳离子的运动和极化,但由于 Nd³⁺ 和 La³⁺ 的半径相差不大,所以,ε_r 下降不明显。从整体来看,BSN 陶瓷材料在微波下的 Q × f 值随着 Nd₂O₃ 掺杂量的增大而增大,主要是由于:

1) 六边形堆垛 AO₃ 密排层间距不断减小使阳离子运动和极化受阻,降低了非谐振损耗(本征损耗)。

2) 属于正交晶系的具有层状钙钛矿结构的 La₂TiO₅ 量不断减少,其本身较差的微波性能影响了主晶相的性能。

3) 随着 Nd³⁺ 含量的增大,晶粒变小,气孔减少,样品致密度增大,降低了陶瓷的非本征损耗。

图 6 为 BSN1# ~ 4# 的 τ_f 随 Nd₂O₃ 掺杂量的变化。

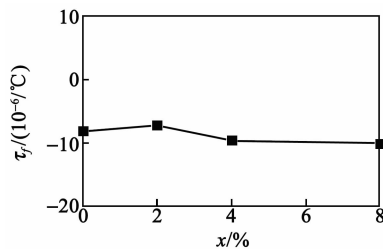


图 6 BSN1# ~ 4# 的谐振频率温度系数

由图 6 可见,随着 Nd₂O₃ 添加量的增加,τ_f 在 -7.2 ~ -10.1 μ°C⁻¹ 范围内变化,其原因是:

1) B 位缺位的六方层状密堆积结构中的氧八

面体厚度的改变对 τ_f 有一定的影响。

2) 样品的密度、晶粒大小及棒状和块状晶粒的比例可能对 τ_f 有一定的影响。

综上所述, Nd₂O₃ 掺杂对于 (Sr_{0.9} Ba_{0.1}) La₄ Ti₄ O₁₅ 陶瓷的 ε_r 和 τ_f 影响不大,却能有效提高材料的 Q × f 值,其中 BSN3# 陶瓷具有最佳微波介电性能: ε_r = 43. 2, Q × f = 42 015 GHz, τ_f = -9. 6 μ°C⁻¹, 是一种高性能中介电常数微波介质陶瓷材料,有望用于设计制作小型化微波元器件。

3 结论

1) Nd₂O₃ 掺杂 (Sr_{0.9} Ba_{0.1}) La₄ Ti₄ O₁₅ 陶瓷形成固溶体 (Ba, Sr) (La, Nd)₄ Ti₄ O₁₅ 相,并伴随有少量第二相 La₂TiO₅ 的生成,随着 Nd₂O₃ 掺杂量的增加,陶瓷的晶粒逐渐减小、烧结温度逐渐降低。

2) 随着 Nd₂O₃ 掺杂量的增加, (Sr_{0.9} Ba_{0.1}) La₄ Ti₄ O₁₅ 陶瓷的 ε_r 和 τ_f 变化不大,而 Q × f 值得到明显提高。

3) 本文实验条件下,掺杂 4% Nd₂O₃ 的 (Sr_{0.9} Ba_{0.1}) La₄ Ti₄ O₁₅ 陶瓷具有最优微波介电性能: ε_r = 43. 2, Q × f = 42 015 GHz (6. 024 GHz), τ_f = -9. 6 μ°C⁻¹。

参考文献:

- [1] REANEY I M. Microwave dielectric ceramics for resonators and filters in mobile phone networks[J]. J Am Ceram Soc, 2006, 89(7):2063-2072.
- [2] FREER R, AZOUGH F. Microstructural engineering of microwave dielectric ceramics[J]. J Eur Ceram Soc, 2008, 28(7):1433-1441.
- [3] 李志强, 高峰, 胡国辛, 等. Ba(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O₃-ZnNb₂O₆ 复相陶瓷的显微结构和介电性能[J]. 硅酸盐学报, 2014, 3:280-285.
- LI Zhiqiang, GAO Feng, HU Guoxin, et al. Microstructure and dielectric properties of Ba(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O₃-ZnNb₂O₆ composite ceramics[J]. J Chin Ceram Soc, 2014, 3:280-285.
- [4] VINEIS C, DAVIESP K. Microwave dielectric properties of hexagonal perovskites[J]. Mater Res Bull, 1996, 31(5):431-437.
- [5] JAWAHAR I N, SANTHA N I, SEBASTIAN M T, et al. Microwave dielectric properties of MO-La₂O₃-TiO₂ (M = Ca, Sr, Ba) ceramics[J]. J Mater Res, 2002, 17(12):3084-3089.
- [6] OHSATO H, TOHDO Y, KAKIMOTO K, et al. Crystal strycture and microwave dielectric properties of Ba_nLa₄Ti_{3+n}O_{12+3n} homologous compounds with high dielectric constant and high quality factor[J]. Ce-

- ram Eng Sci Proc, 2003, 24:75-80.
- [7] TOHDO Y, KAKIMOTO K, OHSATO H, et al. Microwave dielectric properties and crystal structure of homologous compounds $ALa_4Ti_4O_{15}$ ($A = Ba, Sr$ and Ca) [J]. J Eur Ceram Soc, 2006, 26:2039-2043.
- [8] ZHENG H, WOODWARD D I, GILLIE L, et al. Structure and microwave dielectric properties of $Ba-La_4Ti_4O_{15}$ [J]. J Phys Condensed Matter, 2006, 18: 7051-7062.
- [9] FUKAMI Y, WADA K, KAKIMOTO K, et al. Microstructure and microwave dielectric properties of $Ba-La_4Ti_4O_{15}$ ceramics with template particles [J]. J Eur Ceram Soc, 2006, 26:2055-2058.
- [10] PEI J, YUE Z X, ZHAO F, et al. Microwave dielectric ceramics of hexagonal $(Ba_{1-x}A_x)La_4Ti_4O_{15}$ ($A = Sr, Ca$) for base station applications [J]. J Alloys Compound, 2008, 459:390-394.
- [11] 刘林, 方有维, 邓新峰, 等. $(Ba_{1-x}Sr_x)La_4Ti_4O_{15}$ ($x = 0.8 \sim 0.95$) 陶瓷的微结构及微波介电性能研究 [J]. 无机材料学报, 2012, 27(3):281-284.
LIU Lin, FANG Youwei, DENG Xinfeng, et al. Crystal structures and microwave dielectric properties of $(Ba_{1-x}Sr_x)La_4Ti_4O_{15}$ ($x = 0.8 \sim 0.95$) ceramics [J]. J Inorg Mater, 2012, 27(3):281-284.
- [12] 王娅, 张树人, 周晓华. $Ba_{0.2}Sr_{0.8}La_4Ti_4O_{15}$ 微波介电陶瓷的两步烧结法制备及性能表征 [J]. 电子元件与材料, 2013, 23(1):10-13.
WANG Ya, ZHANG Shuren, ZHOU Xiaohua. Property study of $Ba_{0.2}Sr_{0.8}La_4Ti_4O_{15}$ microwave dielectric ceramics prepared by two-step sintering [J]. Electron Compon Mater, 2013, 23(1):10-13.
- [13] 王利, 高峰, 张大帅, 等. $(Sr_{1-x}Ba_x)La_4Ti_4O_{15}$ 微波介质陶瓷的显微结构及介电性能 [J]. 压电与声光, 2016, 38(2):207-211.
WANG Li, GAO Feng, ZHANG Dashuai, et al. Microstructure and microwave dielectric properties of $(Sr_{1-x}Ba_x)La_4Ti_4O_{15}$ ceramics [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2016, 38(2):207-211.
- [14] YUE Z X, ZHAO F, GUI Z L, et al. Phases, microstructure and microwave dielectric properties of hexagonal perovskite $Ca(La_{1-x}Nd_x)_4Ti_4O_{15}$ ceramics [J]. J Alloys Compd, 2005, 395(1/2):126-131.
- [15] 刘向春, 高峰, 邓军平, 等. ABO_3 型钛铁矿结构化合物的容差因子 [J]. 无机材料学报, 2008, 23(5): 881-885.
LIU Xiangchun, GAO Feng, DENG Junping, et al. Tolerance factor of ABO_3 -type ilmenite compound [J]. J Inorg Mater, 2008, 23(5):881-885.

(上接第 891 页)

- [3] RINGGAARD E, LAUTZENHISER F, BIERRE-GAARD L M, et al. Development of porous piezoceramics for medical and sensor applications [J]. Materials, 2015, 8(12):8877-8889.
- [4] 张振鹏, 张剑, 赵洪. 基于 PA78 的快速响应压电陶瓷驱动电源的研制 [J]. 压电与声光, 2007, 29(4): 420-422.
ZHANG Zhengpeng, ZHANG Jiang, ZHAO Hong. Development of a PZT power supply with quick response based on PA78 [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2007, 29(4):420-422.
- [5] 刘岩, 邹文栋. 一种高速压电陶瓷驱动器驱动电源设计 [J]. 压电与声光, 2008, 30(1):48-49.
LIU Yan, ZOU Wendong. A high-speed driving power design for piezoelectric ceramic actuator [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2008, 30(1):48-49.
- [6] KANEKO T, OHMI T, OHYA N, et al. A new, compact and quick-response dynamic focusing lens [J]. In Solid State Sensors and Actuators, 1997:63-66.
- [7] FAN M, HUANG L, LI M, et al. A fast high voltage driver for the piezoelectric fast steering mirror [J]. In XX International Symposium on High Power Laser Systems and Applications, 2015:925539-925539.
- [8] PAN Q S, LIU Y B, LIU Y H, et al. Design and fabrication of a large displacement piezoelectric actuator [J]. In Piezoelectricity, Acoustic Waves, and Device Applications (SPA WDA), 2015:261-264.
- [9] KOLSKY H. Stress waves in solids [J]. Journal of Sound and Vibration, 1964, 1:88-110
- [10] 栾桂冬, 张金铎, 王仁乾. 压电换能器和换能器阵 [M]. 北京: 北京大学出版社, 1990.
- [11] 王礼立. 应力波基础 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [12] 王刚, 安琳. COMSOL Multiphysics 工程实践与理论仿真: 多物理场数值分析技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2012.
- [13] NOROUZI M, KASHANINIA A. Design of piezoelectric microcantilever chemical sensors in COMSOL multiphysics area [J]. Journal of Electrical and Electronics Engineering, 2009(1):184.
- [14] 阮鹏, 陈智军, 付大丰. 基于 COMSOL 的声表面波器件仿真 [J]. 测试技术学报, 2012, 26(5):422-428.
RUAN Peng, CHEN Zhijun, FU Dafeng. Simulation of surface acoustic wave device based on COMSOL [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2012, 26(5):422-428.