

文章编号:1673-9469(2009)04-0087-05

$A(B'B'')O_3$ 型钙钛矿材料中有序结构与介电损耗的研究

谢艳¹, 王玉国¹, 门高夫¹, 胡明哲²

(1. 河北工程大学 理学院, 河北 邯郸 056038; 2. 湖北大学 湖北省铁电压电材料与器件省重点实验室, 湖北 武汉 430062)

摘要:以 $A(B'_{1/3}B''_{2/3})O_3$ 和 $A(B'_{1/2}B''_{1/2})O_3$ 型复杂钙钛矿材料为对象,介绍了 B 位长程有序结构,分析了有序结构对微波介电损耗的影响。B 位长程有序结构是影响介电损耗的重要因素,随有序度的提高,介电损耗逐渐减小。并且从烧结工艺和化学组成两方面讨论了提高材料有序度的途径。适当地提高烧结温度、进行低温退火或降低冷却速率均能有效地提高材料的有序度;进行离子取代,也能促使 B 位有序结构的形成。

关键词:复杂钙钛矿; B 位长程有序; 有序度; 介电损耗

中图分类号: TQ174.75

文献标识码: A

Research on the ordering and dielectric loss in $A(B'B'')O_3$ complex perovskite

XIE Yan¹, WANG Yu-guo¹, MEN Gao-fu¹, HU Ming-zhe²

(1. College of Science, Hebei University of Engineering, Hebei Handan 056038, China; 2. Key Lab of Ferro & Piezoelectric Materials and Devices of Hubei Province, Hubei University, HubeiWuhan 430062, China)

Abstract: Complex perovskites with general formula $A(B'_{1/3}B''_{2/3})O_3$ and $A(B'_{1/2}B''_{1/2})O_3$ have been investigated to analyse the structure of B - site long - range order (LOR) and the effect of ordered structure on microwave dielectric loss. Ordering plays an important role in the dielectric loss. The dielectric loss decreases with the degree of LOR increasing. Moreover, methods to improve the degree of ordering such as sintering and chemical composition are discussed. Increasing the sintering temperature, reannealing at lower temperature and decreasing the cooling rate can effectively improve the degree of LOR. Besides, cation doping could also promote the formation of B - site ordered structure.

Key words: complex perovskite; B - site long - range order; degree of ordering; dielectric loss

$A(B'B'')O_3$ 型复杂钙钛矿材料在微波频段具有中等的介电常数 ϵ , 低的介电损耗 $\tan\delta$ (即高的 Qf 值) 且温度稳定性较好, 因此在微波领域具有重要的研究意义和应用价值。其中有序态的 $Ba(B'_{1/3}B''_{2/3})O_3$ ($B' = Mg, Zn, Ni, Co$; $B'' = Ta, Nb$) 和 $A(B'_{1/2}B''_{1/2})O_3$ ($A = La, Nd$; $B' = Mg, Zn$; $B'' = Ti, Sn$) 体系陶瓷因在高频下具有极低的介电损耗而备受关注。已有大量实验证明^[1-4], 通过优化烧结工艺和掺杂改性可进一步减小材料的介电损耗。目前, 运用晶格振动谱研究这些低损耗材料的机理逐渐成为焦点^[5-8], 如将拉曼光谱和远红外光谱

结合起来研究材料的有序结构与介电损耗间的关系。本文介绍了 $A(B'B'')O_3$ 型复杂钙钛矿材料的 B 位长程有序结构, 分析了有序结构对介电损耗的影响, 并讨论了提高材料有序度的途径。对设计、开发和制备出更多低损耗的微波介质陶瓷材料具有重要意义。

1 $A(B'B'')O_3$ 中 B 位长程有序结构

$A(B'B'')O_3$ 钙钛矿结构可以用简单立方晶格来描述, 如图 1 所示, A 离子占据晶胞的顶角, B 离

收稿日期: 2009-09-23

基金项目: 邯郸市科学技术研究与发展计划项目(0921120068-5)

作者简介: 谢艳(1980-), 女, 河北邯郸人, 硕士, 助教, 从事功能陶瓷材料的研究。

子(包括 B' 和 B'' 离子)占据体心,氧离子占据六个面心。把面心的氧离子连接起来,围成一个八面体,称为氧八面体, B 离子位于其中。处于无序状态时, B' 、 B'' 离子随机地分布在 B 位上。 B 位有序是指 B' 、 B'' 离子按一定比例有规律地排列在 B 位上。通常认为, B' 与 B'' 离子的半径和电荷相差越大越易形成有序结构。研究最多的是 $Ba(B'_{1/3}B''_{2/3})O_3$ 体系的 1:2B 位长程有序和 $A(B'_{1/2}B''_{1/2})O_3$ 体系的 1:1B 位长程有序。如 $Ba(B'_{1/3}B''_{2/3})O_3$ 的无序态属于立方晶系。有序态属于六方晶系,是沿立方单胞的 $\langle 111 \rangle$ 方向产生的氧八面体的菱形畸变造成的(此时晶胞称为赝立方晶胞),同时伴随轻微的体积增长。 B' 、 B'' 离子在 $\langle 111 \rangle$ 方向上以 1:2 比例按 $B':B'':B''\dots$ 的顺序排列。图 2 为沿 $\langle 100 \rangle$ 方向看去的 1:2 有序 $Ba(B'_{1/3}B''_{2/3})O_3$ 。图中 A 离子未画出,黑色的是 $B'O_6$ 八面体,灰色的是 $B''O_6$ 八面体,○代表氧离子,△代表 B' 离子,☆代表 B'' 离子。

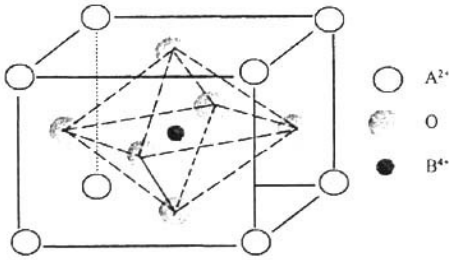


图1 $A(B'B'')O_3$ 钙钛矿晶胞的结构图
Fig.1 Structure of $A(B'B'')O_3$ perovskite cell

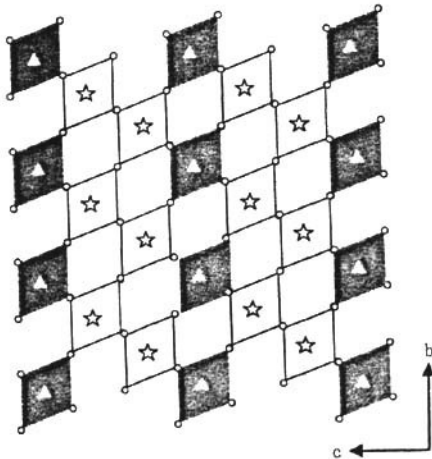


图2^[9] $A(B'_{1/3}B''_{2/3})O_3$ 1:2 有序的结构图
Fig.2 Structure of 1:2 ordered $A(B'_{1/3}B''_{2/3})O_3$

有序度用来描述材料内部离子有序排列的区域的多少。对于 $A(B'B'')O_3$ 钙钛矿材料, B 位离子越易形成有序排列, B 位有序度就越高。目前,研究发现其有序度可通过改变烧结工艺和化学组分进行控制。

2 B 位长程有序结构对介电损耗的影响

介电损耗是指电介质在外电场作用下,将一部分电能转化成热能的物理过程。影响介电损耗的因素包括本征因素(材料组成、晶体结构)和非本征因素(缺陷、空隙、第二相),有序结构属于本征因素。

微波介质陶瓷的介电性能主要由离子位移极化决定。以洛伦兹色散理论为基础,根据晶格点阵振动的一维模型,可得到,在频率 ω 下由离子位移极化产生的复介电常数 $\epsilon^*(\omega)$ 为^[10-12]

$$\epsilon^*(\omega) = \epsilon'(\omega) - j\epsilon''(\omega) = \epsilon(\infty) + \frac{(ze)^2/mzV\epsilon_0}{\omega_T^2 - \omega^2 - j\gamma\omega} \quad (1)$$

式中 $\epsilon(\infty)$ —由电子位移极化引起的介电常数;
 z —离子电价; e —单位电荷; $m = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$ —离子的换算质量, m_1 和 m_2 —正、负离子的质量; V —单元晶胞的体积; γ —衰减常数; ω_T —点阵振动的横向光学模的角频率。

在离子晶体中, ω_T 的值在 $10^{12} \sim 10^{13}$ Hz 的远红外区,所以在一般的微波范围内 $\omega_T \gg \omega$,从而可近似得

$$\epsilon'(\omega) = \epsilon(\infty) + \frac{(ze)^2/mzV\epsilon_0}{\omega_T^2} \quad (2)$$

$$\tan\delta = \frac{\epsilon''(\omega)}{\epsilon'(\omega)} \approx \frac{\gamma}{\omega_T^2} \omega \quad (3)$$

将 $m\omega_T^2 = \beta - \frac{(ze)^2}{3V\epsilon_0}$ 代入式(3)得

$$\tan\delta \approx \frac{\gamma\omega m}{\beta - (ze)^2/3V\epsilon_0} \quad (4)$$

$$Q = \frac{1}{\tan\delta} \approx \frac{\beta - (ze)^2/3V\epsilon_0}{\gamma\omega m} \quad (5)$$

$$Qf \approx \frac{\beta - (ze)^2/3V\epsilon_0}{2\pi m\gamma} \quad (6)$$

式中 f —测试频率。

从式(4)~式(6)可以看出, $\tan\delta \propto \gamma$, 因此当频率一定时,衰减系数 γ 越小介电损耗就越低。 Q 称为品质因数,与 $\tan\delta$ 互为倒数。 Qf 与测试频率

无关,因此也常用 Q_f 衡量材料的介电性能。

有序度的改变只是造成晶胞体积轻微的改变,因此晶胞体积的影响可忽略不计,可单考虑有序结构对衰减系数的影响进而对介电损耗的影响。研究表明,随着晶体长程有序度的增加,B位离子与氧离子之间键质发生了变化,离子性成分会减少,共价性成分增加,共价性成分的增加会造成一个更强的价键振动,阻尼系数会减小,于是介电损耗减小即 Q_f 值增加^[13-14]。

3 提高 B 位长程有序度的途径

3.1 烧结工艺

有序度的提高与烧结工艺密切相关,提高烧结温度与低温退火都能有效地提高材料的有序度。B位离子有序-无序的转变是通过离子扩散来实现的。陶瓷的烧结温度及退火处理是影响离子扩散的重要因素。研究表明^[15],在烧结温度低于有序-无序相转变温度的前提下,升高烧结温度可促使B位离子有序排列,从而降低介电损耗,增大 Q_f 值。如图3中给出了不同烧结温度下, $BaMg_{1/3}Nb_{2/3}O_3$ 陶瓷的介电损耗和 Q_f 值。这是因为升高烧结温度可提供足够大能量使更多的离子能够越过一定的势垒实现扩散,从而使有序区域增多,即提高有序度。对于 $Ba(B'_{1/3}B''_{2/3})O_3$ ($B' = Zn, Ni, Co; B'' = Ta, Nb$) 体系微波介质陶瓷,升高烧结温度除促进离子扩散外,还会使 ZnO, NiO, CoO 挥发,造成非化学计量比, Ba^{2+} 离子部分取代 B'' 离子使 B' 位和 B'' 位离子半径相差变大,从而有利于B位有序结构的形成^[16-19]。退火处理可使离子扩散均匀也有助于有序结构的产生。

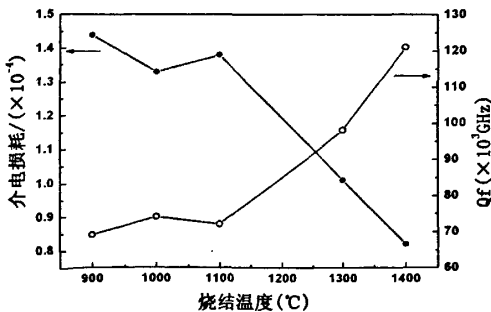


图3 烧结温度对BMN陶瓷介电性能的影响

Fig. 3 Dielectric properties vs. sintering temperature for BMN ceramics

另外,人们还研究了冷却速率对材料有序度

的影响。如 Lin 等^[19]采用混合氧化物法制备了 $0.35Ba(Ni_{1/3}Nb_{2/3})O_3 - 0.65Ba(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O_3$ 陶瓷。通过分析 X 射线衍射光谱得出,冷却速率为 $240^\circ\text{C}/\text{h}$ 时,样品呈立方无序结构,而冷却速率为 $10^\circ\text{C}/\text{h}$ 和 $20^\circ\text{C}/\text{h}$ 的样品均呈六方有序结构。此外,观察 SEM 照片发现,慢速冷却的样品,其基质颗粒,化学成分均匀性相当好,而快速冷却的样品呈现两种不同的成分,Zn 含量低的 BNN 颗粒和 Ni 含量低的 BZN 颗粒。由此可以看出,降低冷却速率可使样品的化学成分均匀,提高有序度。

3.2 化学组成

对于 $A(B'B'')O_3$ 型钙钛矿材料, B' 与 B'' 离子的电荷、半径相差越大,越易形成 B 位有序结构。因此,可采用 B 位离子取代来提高有序度。如 $La(MgTi)_{0.5}O_3$ 和 $La(MgSn)_{0.5}O_3$ 都具有 1:1B 位长程有序结构。因为 Ti^{4+} (0.61\AA) 与 Mg^{2+} (0.72\AA) 离子半径相差 0.11\AA ,而 Sn^{4+} (0.71\AA) 与 Mg^{2+} (0.72\AA) 离子半径只差 0.01\AA ,所以 LMT(92%) 的有序度高于 LMS(89%)^[20]。但是,并不是说用与 B' (B'') 位离子半径或电荷相差较大的离子部分取代 B'' (B') 位离子就一定能提高有序度。Babu 等^[7]在研究 $La(Mg_{0.5}Ti_{(0.5-x)}Sn_x)O_3$ 体系陶瓷时,发现随 Sn 含量增加,介电常数减小。根据介电常数越小,介电损耗越小的传统介电理论,介电损耗应减小即 Q_f 值增大。但事实上, $x < 0.25$ 时,随 Sn 含量增加, Q_f 值逐渐减小; $x = 0.25$ 时, Q_f 值达到最小 $54\ 860\ \text{GHz}$; $x > 0.25$ 时, Q_f 值又逐渐增大,如图4所示。Babu 将这种异常现象归因于材料 B 位离子 1:1 有序,认为无论是 Sn^{4+} 离子取代 LMT 中的 Ti^{4+} 离子,还是 Ti^{4+} 离子取代 LMS 中的 Sn^{4+} 离子都将破坏材料的有序结构,从而增加介电损耗即 Q_f 值减小。

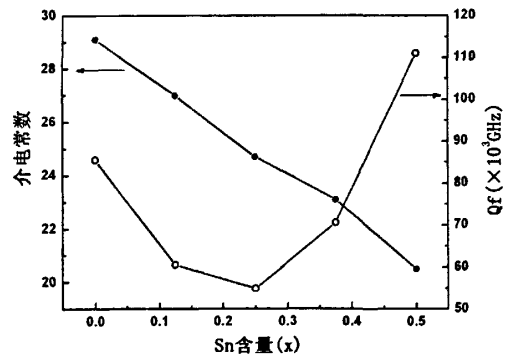


图4 $La(Mg_{0.5}Ti_{(0.5-x)}Sn_x)O_3$ 陶瓷的介电性能

Fig. 4 properties of $La(Mg_{0.5}Ti_{(0.5-x)}Sn_x)O_3$ ceramics

CHEN Yi - Chun 等^[6]在研究 $x\text{Ba}(\text{Mg}_{1/3}\text{Ta}_{2/3})\text{O}_3 - (1-x)\text{Ba}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ 体系陶瓷时,也出现了该现象。他解释为材料 B 位离子 1:2 有序,虽然 BMT 的有序度比 BMN 的有序度高,但无论是 Ta^{5+} 离子取代 BMN 中的 Nb^{5+} 离子还是 Nb^{5+} 离子取代 BMT 中 Ta^{5+} 离子,都会破坏材料的有序结构,增加介电损耗。

由于 Nb_2O_5 比 Ta_2O_5 廉价,近年来, $\text{Ba}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ 体系陶瓷备受关注。但是,高温烧结时 ZnO 易挥发,造成非化学计量,粒界间产生富 Nb、富 Ba 液相,粒界间缺陷浓度增大,加强了 B 位离子间扩散(包括 Zn^{2+} 离子向 B' 位扩散和 Nb^{5+} 离子向 B' 位扩散),促使 B 位离子排列无序^[21]。 $\text{Ba}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ 的相转变温度为 $1\ 375\ ^\circ\text{C}$,即烧结温度低于该温度时为有序 - 无序结构的混合,且有序度随烧结温度的升高而增大,当烧结温度高于该温度时为完全无序。报道的 $\text{Ba}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ 的 Qf 值最高为 87 000(烧结温度为相转变温度时)。Ahn 等^[16]采用 Co 取代部分 Zn 提高了其相转变温度,提高了 Qf 值,如在 $1\ 400\ ^\circ\text{C}$ 烧结的 $0.7\text{BCN} - 0.3\text{BZN}$ 陶瓷的 Qf 值高达 97 000 GHz。

有些添加剂通过离子扩散固溶至晶格内,也会影响材料的有序结构。许多研究者^[22-25]在 $\text{Ba}(B'_{1/3}B''_{2/3})\text{O}_3$ ($B' = \text{Mg}, \text{Zn}; B'' = \text{Ta}, \text{Nb}$) 体系陶瓷中掺入少量 BaWO_4 促进 B 位离子有序结构的形成,从而提高材料的 Qf 值。田中青等^[25]研究了 BaWO_4 掺杂量对 BMN 陶瓷结构和微波介电性能的影响。纯 BMN 陶瓷的有序度比较低, Qf 值只有 38000GHz。 $(1-x)\text{BMN} - x\text{BWO}$ 的所有样品晶粒尺寸变化不大且当 $x \geq 0.01$ 时样品相对密度大于 96%,晶粒尺寸和样品密度对 Qf 值的影响可忽略不计,因此可在 $0.01 \leq x \leq 0.03$ 范围内研究了 B 位有序结构对 Qf 值的影响。 BaWO_4 中的 W^{6+} 离子取代 BMN 中的 Nb^{5+} 离子, Mg^{2+} (0.72\AA) 与 W^{6+} (0.58\AA) 离子半径和电荷相差大于 Mg^{2+} (0.72\AA) 与 Nb^{5+} (0.64\AA) 离子半径和电荷相差。因此, BaWO_4 的掺入可促进 B 位有序结构的形成。此外, W^{6+} 离子取代 Nb^{5+} 离子可使 BMN 中出现 Nb 空位和氧空位,提高 B 位离子的扩散率促进 B 位离子有序排列。这样,随 BaWO_4 掺杂量增加有序度逐渐增大, Qf 值也随之增大。当掺入量为 0.03 mol 时,有序度最高, Qf 值达到最大 82 300GHz。掺入量大于 0.03mol 后由于第二相 BaWO_4 和

$\text{Ba}_3\text{Nb}_4\text{O}_{15}$ 的产生使 Qf 值急剧下降。

4 结论

综上所述,材料的有序结构是影响介电损耗的一个因素,通过优化烧结工艺、改变化学组成可改善复杂钙钛矿 $A(B'B'')\text{O}_3$ 中 B 位离子的有序化程度,降低介电损耗。在烧结工艺方面,当烧结温度低于有序 - 无序相转变温度时,适当地提高烧结温度和进行低温退火均能提高材料的有序度。此外,降低冷却速率也能达到该目的。在化学组成方面,进行离子取代,使 B' 与 B'' 离子的电荷、半径相差增大,能促使 B 位有序结构的形成。另外,加入添加剂也可改善有序化程度,分两种情况:(1)添加剂使材料的有序 - 无序相转变温度升高,在更高温度烧结时,材料仍处于有序态并能提高有序化程度;(2)添加剂扩散固溶到晶格内实现离子取代。

参考文献:

- [1] SEABRA M P, FERRIRA V M, ZHENG H, *et al.* Structure property relation in $\text{La}(\text{Mg}_{1/2}\text{Ti}_{1/2})\text{O}_3$ - based solid solutions [J]. *J Appl Phys*, 2005(97): 1101 - 1109.
- [2] HU M Z, GU H S, CHU X C, *et al.* Crystal structure and dielectric properties of $(1-x)\text{Ca}_{0.61}\text{Nd}_{0.26}\text{TiO}_3 + x\text{Nd}(\text{Mg}_{1/2}\text{Ti}_{1/2})\text{O}_3$ complex perovskite at microwave frequencies [J]. *J Appl Phys*, 2008(104): 2040 - 2047.
- [3] CHANG P J, CHIA C T, LIN I N, *et al.* Characterizing $x\text{Ba}(\text{Mg}_{1/3}\text{Ta}_{2/3})\text{O}_3 + (1-x)\text{Ba}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ microwave ceramics using extended x - ray absorption fine structure method [J]. *Appl Phys Lett*, 2006(88): 1503 - 1510.
- [4] DAI Y D, ZHAO G H, LIU H X. First - principles study of the dielectric properties of $\text{Ba}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ and $\text{Ba}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ [J]. *J Appl Phys*, 2009(105): 1821 - 1829.
- [5] DIAS A, MOREIRA R L. Far - infrared spectroscopy in ordered and disordered $\text{BaMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$ microwave ceramics [J]. *J Appl Phys*, 2003(94): 3414 - 3421.
- [6] CHEN Y C, CHENG H F, LIU H L, *et al.* Correlation of microwave dielectric properties and normal vibration mode of $x\text{Ba}(\text{Mg}_{1/3}\text{Ta}_{2/3})\text{O}_3 - (1-x)\text{Ba}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ ceramics: II. Infrared spectroscopy [J]. *J Appl Phys*, 2003, 94 (5): 3365 - 3370.
- [7] BABU G S, SUBRAMANIAN V, MURTHY V R K, *et al.* Far - infrared, Raman spectroscopy, and microwave dielectric properties of $\text{La}(\text{Mg}_{0.5}\text{Ti}_{0.5-x}\text{Sn}_x)\text{O}_3$ ceramics [J]. *J Appl Phys*, 2007(102): 2175 - 2186.

- [8] BABU G S, SUBRAMANIAN V, MURTHY V R K, *et al.* Crystal structure, Raman spectroscopy, far - infrared, and microwave dielectric properties of $(1-x)\text{La}(\text{MgSn})_{0.5}\text{O}_3 - x\text{Nd}(\text{MgSn})_{0.5}\text{O}_3$ system [J]. *J Appl Phys*, 2007(103): 2761 - 2769.
- [9] DENG J X, CHEN J, YU R B, *et al.* Crystallographic and Raman spectroscopic studies of microwave dielectric ceramics $\text{Ba}(\text{Ca}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ [J]. *J Alloys Compd*, 2009(472): 502 - 506.
- [10] 孙目珍. 介电质物理基础[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 1999.
- [11] 方容川. 固体光谱学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2000.
- [12] 张迎春. 铋钽酸盐微波介质陶瓷材料[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [13] 胡明哲, 周东祥, 龚树萍. 微波介质陶瓷介电性影响因素的研究[J]. *材料导报*, 2004, 18(8): 7 - 10.
- [14] 朱建华, 梁飞, 汪小红, 等. 微波介质陶瓷材料介电性能间的制约关系[J]. *电子元件与材料*, 2005, 124(3): 32 - 35.
- [15] DIAS A, MOREIRA R L. Far - infrared spectroscopy in ordered and disordered $\text{BaMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$ microwave ceramics [J]. *J Appl Phys*, 2003(94): 3414 - 3421.
- [16] AHN C W, JANG H J, NAHM S, *et al.* Effects of microstructure on the microwave dielectric properties of $\text{Ba}(\text{Co}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ and $(1-x)\text{Ba}(\text{Co}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3 - x\text{Ba}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ ceramics [J]. *J Eur Ceram Soc*, 2003(23): 2473 - 2478.
- [17] SHIMADA T. Effect of Ni substitution on the dielectric properties and lattice vibration of $\text{Ba}(\text{Mg}_{1/3}\text{Ta}_{2/3})\text{O}_3$ [J]. *J Eur Ceram Soc*, 2006(26): 1781 - 1785.
- [18] BARWICK M, AZOUGH F, FREER R. Structure and dielectric properties of perovskite ceramics in the system $\text{Ba}(\text{Ni}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3 - \text{Ba}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ [J]. *J Eur Ceram Soc*, 2006(26): 1767 - 1773.
- [19] LIN I N, CHIA C T, LIU H L. Intrinsic dielectric and spectroscopic behavior of perovskite $\text{Ba}(\text{Ni}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3 - \text{Ba}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ microwave dielectric ceramics [J]. *J Appl Phys*, 2007(102): 2072 - 2083.
- [20] BABU G S, SUBRAMANIAN V, MURTHY V R K. Structure determination and microwave dielectric properties of $\text{La}(\text{MgSn})_{0.5}\text{O}_3$ ceramics [J]. *J Eur Ceram Soc*, 2007(27): 2973 - 2976.
- [21] KIM I T, HONG K S, YOON S J. Effects of non - stoichiometry and chemical inhomogeneity on the order - disorder phase formation in the complex perovskite compounds, $\text{Ba}(\text{Ni}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ and $\text{Ba}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ [J]. *J Mater Sci*, 1995(30): 514 - 521.
- [22] KIM Y K, LEE K M, JANG H M. 1 : 2 Long - range ordering and defect mechanism of WO_3 - doped perovskite $\text{Ba}(\text{Mg}_{1/3}\text{Ta}_{2/3})\text{O}_3$ [J]. *J Mater Sci*, 2000(35): 4885 - 4893.
- [23] PARK C S, NAHM S, KIM Y S *et al.* Effect of WO_3 on the Microstructure and Microwave Characteristics of $\text{Ba}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ Ceramics [J]. *J Korean Phys Soc*, 1998(32): 340 - 342.
- [24] KIN J S, KIM J W, CHEON C I *et al.* Effect of chemical element doping and sintering atmosphere on the microwave dielectric properties of barium zinc tantalates [J]. *J Eur Ceram Soc*, 2001(21): 2599 - 2604.
- [25] TIAN ZHONGQING, LIU HANXING, YU HONGTAO *et al.* Effect of BaWO_4 on microstructure and microwave dielectric properties of $\text{Ba}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ [J]. *Mater Chem and Phys*, 2004(86): 228.

(责任编辑 马立)

作者: 谢艳, 王玉国, 门高夫, 胡明哲, XIE Yan, WANG Yu-guo, MEN Gao-fu, HU Ming-zhe
作者单位: 谢艳, 王玉国, 门高夫, XIE Yan, WANG Yu-guo, MEN Gao-fu(河北工程大学, 理学院, 河北, 邯郸, 056038), 胡明哲, HU Ming-zhe(湖北大学, 湖北省铁电压电材料与器件省重点实验室, 湖北, 武汉, 430062)
刊名: 河北工程大学学报(自然科学版) 
英文刊名: JOURNAL OF HEBEI UNIVERSITY OF ENGINEERING(NATURAL SCIENCE EDITION)
年, 卷(期): 2009, 26(4)

参考文献(25条)

1. SEABRA M P;FERRIRA V M;ZHENG H Structure property relation in La(Mg_{1/2},Ti_{1/2})O₃-based solid solutions[期刊论文]-Journal of Applied Physics 2005(97)
2. HU M Z;GU H S;CHU X C Crystal structure and dielectric properties of(1-x)Ca_{0.6}Nd_{0.26}Ti_{0.3}+xNd(Mg_{1/2}Ti_{1/2})O₃ complex perovskite at microwave frequencies[期刊论文]-J Appl Phrs 2008(104)
3. CHANG P J;CHIA C T;LIN I N Characterizing xBa(Mg_{1/3}Ta_{2/3})O₃+(1-x)Ba(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃ microwave ceramics using extended x-ray absorption fine structure method[期刊论文]-Applied Physics Letters 2006(88)
4. DAI Y D;ZHAO G H;LIU H X First-principles study of the dielectric properties of Ba(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O₃ and Ba(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃[期刊论文]-J Appl Phys 2009(105)
5. DIAS A;MOREIRA R L Far-infrared spectroscopy in ordered and disordered BaMg_{1/3}Nb_{2/3}O₃ microwave ceramics[外文期刊] 2003(94)
6. CHEN Y C;CHENG H F;LIU H L Correlation of microwave dielectric properties and normal vibration mode of xBa(Mg_{1/3}Ta_{2/3})O₃-(1-x)Ba(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃ ceramics: II. Infrared spectroscopy[外文期刊] 2003(05)
7. BABU G S;SUBRAMANIAN V;MURTHY V R K Far-infrared, Raman spectroscopy, and microwave dielectric properties of La(Mg_{0.5}Ti_{0.5-x})Sn_xO₃ ceramics[期刊论文]-Journal of Applied Physics 2007(102)
8. BABU G S;SUBRAMANIAN V;MURTHY V R K Crystal structure, Raman spectroscopy, far-infrared, and microwave dielectric properties of (1-x)La(MgSn)_{0.503-x}Nd(MgSn)_{0.503} system[期刊论文]-Journal of Applied Physics 2007(103)
9. DENG J X;CHEN J;YO R B Crystallographic and Raman spectroscopic studies of microwave dielectric ceramics Ba(Ca_{1/3}Nb_{2/3})O₃[外文期刊] 2009(472)
10. 孙目珍 介电质物理基础[期刊论文]-广州:华南理工大学出版社 1999
11. 方容川 固体光谱学[期刊论文]-合肥:中国科学技术大学出版社 2000
12. 张迎春 铌钽酸盐微波介质陶瓷材料[期刊论文]-北京:科学出版社 2005
13. 胡明哲;周东祥;龚树萍 微波介质陶瓷介电性影响因素的研究[期刊论文]-材料导报 2004(08)
14. 朱建华;梁飞;汪小红 微波介质陶瓷材料介电性能间的制约关系[期刊论文]-电子元件与材料 2005(03)
15. DIAS A;MOREIRA R L Far-infrared spectroscopy in ordered and disordered BaMg_{1/3}Nb_{2/3}O₃ microwave ceramics[外文期刊] 2003(94)
16. AHN C W;JANG H J;NAHN S Effects of microstructure on the microwave dielectric properties of Ba(Co_{1/3}Nb_{2/3})O₃ and(1-x)Ba(Co_{1/3}Nb_{2/3})O₃-xBa(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O₃ ceramics[外文期刊] 2003(23)
17. SHINADA T Effect of Ni substitution on the dielectric properties and lattice vibration of

[Ba\(Mg_{1/3}Ta_{2/3}\)O₃](#)[外文期刊] 2006(26)

18. [BARWICK M;AZOUGH F;FREER R](#) [Structure and dielectric properties of perovskite ceramics in the system Ba \(Ni_{1/3}Nb_{2/3}\)O₃-Ba\(Zn_{1/3}Nb_{2/3}\)O₃](#)[外文期刊] 2006(26)

19. [LIN I N;CHIA C T;LIU H L](#) [Intrinsic dielectric and spectroscopic behavior of perovskite Ba\(Ni_{1/3}Nb_{2/3}\)O₃-Ba \(Zn_{1/3}Nb_{2/3}\)O₃ microwave dielectric ceramics](#)[期刊论文]-[Journal of Applied Physics](#) 2007(102)

20. [BABU G S;SUBRAMANIAN V;MURTHY V R K](#) [Structure determination and microwave dielectric properties of La\(MgSn\)_{0.5}O₃ ceramics](#)[外文期刊] 2007(27)

21. [KIN I T;HONG K S;YOON S J](#) [Effects of non-stoichiometry and chemical inhomogeneity on the order-disorder phase formation in the complex perovskite compounds, Ba \(Ni_{1/3}Nb_{2/3}\)O₃ and Ba\(Zn_{1/3}Nb_{2/3}\)O₃](#)[期刊论文]-[Journal of Materials Science](#) 1995(30)

22. [KIM Y K;LEE K M;JANG H M](#) [1:2 Long-range ordering and defect mechanism of WO₃-doped perovskite Ba \(Mg_{1/3}Ta_{2/3}\)O₃](#)[期刊论文]-[Journal of Materials Science](#) 2000(35)

23. [PARK C S;NAHM S;KIM Y S](#) [Effect of WO₃ on the Microstructure and Microwave Characteristics of Ba \(Zn_{1/3}Nb_{2/3}\)O₃ Ceramics](#)[期刊论文]-[Journal of the Korean Physical Society](#) 1998(32)

24. [KIN J S;KIM J W;CHEON C I](#) [Effect of chemical element doping and sintering atmosphere on the microwave dielectric properties of barium zinc tantalates](#)[期刊论文]-[Journal of the European Ceramic Society](#) 2001(21)

25. [TIAN ZHONGQING;LIU HANXING;YU HONGTAO](#) [Effect of BaWO₄ on microstructure and microwave dielectric properties of Ba\(Mg_{1/3}Nb_{2/3}\)O₃](#)[外文期刊] 2004(86)

本文读者也读过(1条)

1. [惠荣. 朱骏. 卢网平. 毛翔宇. 羌锋. 陈小兵](#) [La掺杂诱发层状钙钛矿型铁电体弛豫性相变的介电研究](#)[期刊论文]-[物理学报](#)2004, 53(1)

本文链接: http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_hbjzkjxyxb200904022.aspx