

# Investigation on the Properties of 0.7CaTiO<sub>3</sub>-0.3NdAlO<sub>3</sub> Dielectric Ceramics and Its Microwave Devices by High-Energy Ball Milling Process

Limin Fang<sup>1,2</sup>, Liying Xie<sup>1\*</sup>, Kelun Zhao<sup>2,3\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Physics and Information Engineering, Guangdong University of Education, Guangzhou Guangdong

<sup>2</sup>School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong

<sup>3</sup>Guangzhou GRG Metrology & Test Co., LTD., Guangzhou Guangdong  
Email: lmfang1975@163.com, xieliying@gdei.edu.cn, klzhao1975@163.com

Received: Jun 4<sup>th</sup>, 2018; accepted: Jun. 29<sup>th</sup>, 2018; published: Jul. 6<sup>th</sup>, 2018

---

## Abstract

The high performance 0.7CaTiO<sub>3</sub>-0.3NdAlO<sub>3</sub> dielectric ceramics were prepared by the composite process of ceramic powders by cyclic mixing-high energy ball milling and solid state reaction method. The phase composition, microstructure of the 0.7CaTiO<sub>3</sub>-0.3NdAlO<sub>3</sub> dielectric ceramics and dielectric properties of its microwave devices were analyzed. The results indicated that 0.7CaTiO<sub>3</sub>-0.3NdAlO<sub>3</sub> dielectric ceramics are single-phase orthogonal perovskite-structure. The temperature drift index of the microwave resonator manufactured by 0.7CaTiO<sub>3</sub>-0.3NdAlO<sub>3</sub> dielectric ceramics and the assembled cavity filter are consistent with the technical requirements of microwave resonant components and cavity filters for communication base station.

## Keywords

High-Power Ball-Milling, Cycle Agitation, Dielectric Ceramic, Microwave Device, Temperature Drift

---

# 高能球磨法制备0.7CaTiO<sub>3</sub>-0.3NdAlO<sub>3</sub>介质陶瓷及其微波器件的性能研究

房丽敏<sup>1,2</sup>, 谢丽英<sup>1\*</sup>, 赵可伦<sup>2,3\*</sup>

\*通讯作者。

文章引用: 房丽敏, 谢丽英, 赵可伦. 高能球磨法制备 0.7CaTiO<sub>3</sub>-0.3NdAlO<sub>3</sub> 介质陶瓷及其微波器件的性能研究[J]. 材料科学, 2018, 8(7): 793-801. DOI: 10.12677/ms.2018.87094

<sup>1</sup>广东第二师范学院, 物理与信息工程系, 广东 广州

<sup>2</sup>华南理工大学, 机械与汽车工程学院, 广东 广州

<sup>3</sup>广州广电计量检测股份有限公司, 广东 广州

Email: lmfang1975@163.com, xieliying@gdei.edu.cn, klzhao1975@163.com

收稿日期: 2018年6月4日; 录用日期: 2018年6月29日; 发布日期: 2018年7月6日

## 摘要

本文采用循环搅拌-高能球磨复合型陶瓷粉体制备工艺及固相反应法制备了高性能 $0.7\text{CaTiO}_3\text{-}0.3\text{NdAlO}_3$ 介质陶瓷, 并分析了 $0.7\text{CaTiO}_3\text{-}0.3\text{NdAlO}_3$ 介质陶瓷的物相组成和微观结构及其微波元器件的介电性能。研究表明, 循环搅拌-高能球磨复合型工艺制 $0.7\text{CaTiO}_3\text{-}0.3\text{NdAlO}_3$ 介质陶瓷的物相结构为单相正交钙钛矿晶型;  $0.7\text{CaTiO}_3\text{-}0.3\text{NdAlO}_3$ 介质陶瓷微波谐振器及其组装的腔体滤波器的“温漂”指标均满足通讯基站用微波谐振元件和腔体滤波器的技术要求。

## 关键词

高能球磨, 循环搅拌, 介质陶瓷, 微波器件, 温漂

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

微波介质陶瓷作为主要应用于微波频段电路中完成一种或多种功能的电子陶瓷材料, 已广泛应用于移动通信、卫星通信、全球卫星定位系统(GPS)、蓝牙技术、手机、电视及无线局域网(WLAN)等现代微波通信领域。介质陶瓷不仅是实现微波器件的小型化、高稳定性和微波电路集成化的有效途径, 并已经成为实现微波控制功能和技术的基础和关键材料; 其中,  $0.7\text{CaTiO}_3\text{-}0.3\text{NdAlO}_3$ 基( $\text{CaTiO}_3\text{-NdAlO}_3$ )介质陶瓷是最具代表性的微波介质陶瓷材料[1]-[6]。传统机械混合与固相反应烧结  $\text{CaTiO}_3\text{-NdAlO}_3$  介质陶瓷制备方法主要有以下缺陷[7] [8] [9] [10]: 机械混合的粉料粒度分布取决于原料的粒度范围, 加工过程中对粉料粒径改变量小, 在高温煅烧过程中粉体反应活性较差, 导致需要很高的煅烧温度, 并且反应合成的陶瓷粉体粒径较大、粒度分布宽、掺杂较多, 影响  $\text{CaTiO}_3\text{-NdAlO}_3$  陶瓷的介电性能。一般而言, 通过低熔点氧化物或低熔点玻璃(如  $\text{B}_2\text{O}_3$ 、 $\text{V}_2\text{O}_5$ 、 $\text{Bi}_2\text{O}_3$ )的掺入可以降低陶瓷材料的烧结温度, 但其烧成温度的降低程度有限, 并且烧结助剂也会不同程度地损坏  $\text{CaTiO}_3\text{-NdAlO}_3$  陶瓷的介电性能[8] [9]。采用化学合成方法(金属熔盐法或溶胶-凝胶法)可以制得均匀细小的陶瓷粉体, 但往往需要复杂的控制工艺和价格偏高的原料, 这将进一步增加微波介质元器件的批量生产成本和技术难度。高能球磨(High-Energy Ball Milling)方法作为一种新型电子陶瓷粉体制备技术, 不仅明显降低了反应活化能、细化晶粒、极大提高粉末活性, 并且改善了颗粒分布均匀性, 从而提高了陶瓷材料的致密化程度、介电、热电学性能等, 是一种节能高效的材料制备技术[11] [12] [13] [14]。本文通过干法高能球磨和湿法循环搅拌研磨相结合的陶瓷粉体制备工艺, 并采用固相反应法制备了高性能  $\text{CaTiO}_3\text{-NdAlO}_3$  介质陶瓷材料, 分析了  $\text{CaTiO}_3\text{-NdAlO}_3$  介质陶瓷的物相组成和微观结构及其微波器件的通带频率稳定性。

## 2. 实验

### 2.1. 样品制备

基于传统行星磨湿法研磨混合(以下简称“传统行星磨”)、干法高能球磨-机械合金化(以下简称“高能球磨”)和湿法循环搅拌研磨(以下简称“循环搅拌”)三种基本工艺,本文采用高能球磨和循环搅拌复合型工艺并结合固相反应烧结法制备  $\text{CaTiO}_3\text{-NdAlO}_3$  介质陶瓷材料的工艺流程如图 1 所示,其中的具体工艺参数主要包括:

1) 按化学式  $0.7\text{CaTiO}_3\text{-}0.3\text{NdAlO}_3$  将  $\text{CaCO}_3$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Nd}_2\text{O}_3$ 、 $\text{TiO}_2$  粉料循环搅拌研磨(或行星磨机械混合);以  $\text{ZrO}_2$  磨球为研磨介质,无水乙醇或去离子水为有机溶剂,磨球、混合粉料、溶剂(重量)比例为 3:1:3,其整体容积占球罐的 60%~80%,原料混合时间为 12 小时。注释:原材料中  $\text{CaCO}_3$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Nd}_2\text{O}_3$ 、 $\text{TiO}_2$  的粉料纯度均大于 99.5%。

2) 以  $\text{ZrO}_2$  磨球为研磨介质,将步骤 1)粉体干燥后进行第一次高能球磨(干法)。其中,高能球磨时间为 2 小时,球料比为 12:1,转速为 800 转/分钟。

3) 将干燥后混合原料放在密闭的耐高温坩锅中,经高温反应后合成具有单相正交钙钛矿结构物相的前驱体粉料。其中,煅烧温度为  $900^\circ\text{C}$ ,保温时间为 10 小时。

4) 以二氧化锆磨球为研磨介质,将煅烧后粉料进行循环搅拌研磨(行星磨机械混合/第二次高能球磨)进一步均匀细化的陶瓷粉体。其中,循环搅拌研磨或行星磨机械混合工艺参数参见步骤 1),高能球磨工艺参数参见步骤 2)。

5) 在步骤四中所得粉体中添加质量百分比为 8%的聚乙烯醇(PVA)水溶液(浓度为 5%),利用喷雾干燥塔或造粒机制成球状且流动性好的粉体颗粒。

6) 用压力机(手动或自动填料)将粉体颗粒制成所需形状的压坯,采用双面压制,其压制压力为 120 MPa。

7) 将压坯放入密封的耐高温氧化铝坩锅中,采用适量碳酸钙与氧化钛混合粉料作为垫粉,并将压坯放置在密封匣体中进行连续烧结。其中,最高烧结温度为  $1550^\circ\text{C}$ ,保温时间为 4 小时。

8) 取出烧成瓷体,经端面研磨、抛光、金属化烧结银导电层等表面处理后得到所需谐振元件样品的尺寸,再利用网络分析仪测得其介电性能指标。

### 2.2. 样品检测

采用 D/Max-2500PC 型 X 射线衍射分析仪表征合金试样的物相和晶体结构。采用 ULTRA 55 型热场发射扫描电镜(德国 Zeiss)分析样品的表面和截面形貌,并采用 X-MAX50 型能谱仪(英国 Oxford)分析样

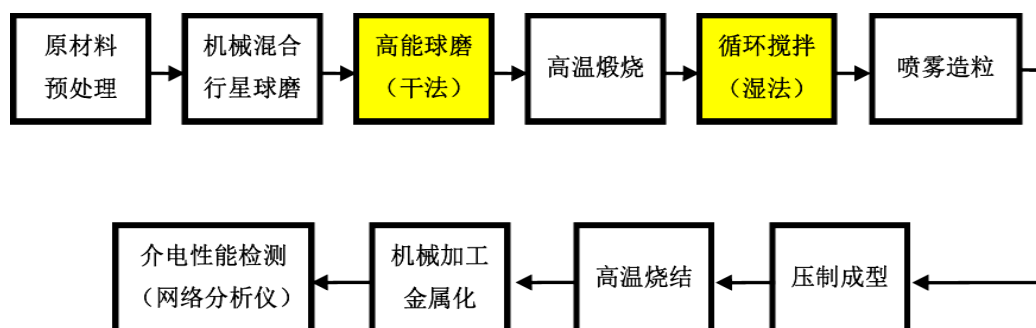


Figure 1. Schematic diagram of preparation process of  $\text{CaTiO}_3\text{-NdAlO}_3$  dielectric ceramic samples  
图 1.  $\text{CaTiO}_3\text{-NdAlO}_3$  介质陶瓷样品的制备工艺流程图

品的局部化学成分。采用 ISO 1183-1:2012 Plastics—Methods for determining the density of non-cellular plastics—Part 1: Immersion method, liquid pycnometer method and titration method (GB/T 1033.1-2008 塑料非泡沫塑料密度的测定第 1 部分浸渍法、液体比重瓶法和滴定法)标准方法测量介质陶瓷样品的相对密度。采用 GB/T 2423.28-2005《电工电子产品环境试验第 2 部分：试验方法试验 T：锡焊》标准方法测试介质陶瓷金属化银浆料的焊接性能。

介质在外加电场时会产生感应电荷而削弱电场，介质中的电场减小与原外加电场(真空中)的比值即为相对介电常数。介电常数是相对介电常数与真空中绝对介电常数乘积。如果有高介电常数的材料放在电场中，电场的强度会在电介质内有可观的下降。谐振器的尺寸和介质材料的介电常数的平方根成反比。因此，电介质材料的介电常数越大，所需要的电介质陶瓷块体就越小，谐振器的尺寸也就越小[3] [4] [5] [6]。滤波器的另一个重要指标是插入损耗低，介质材料的介质损耗是影响介质滤波器插入损耗的一个关键因素。微波介质材料的品质因数与介质损耗成反比关系，即品质因数越大，滤波器的插入损耗就越低。通信器件的工作环境温度不可能一成不变，如果介质材料的谐振频率随温度变化较大，滤波器的载波信号在不同的温度下就会漂移，从而影响设备的使用性能。这就要求材料的谐振频率不能随温度变化太大。因此，微波介质陶瓷材料的频率温度系数的实际要求大致是在 $-40^{\circ}\text{C}\sim 100^{\circ}\text{C}$ 不大于  $10\text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$ ，从而可以实现器件的高稳定性和高可靠性。本文采用安捷伦 HP4396B 型网络分析仪测量介质陶瓷片的介电常数及自制单腔微波谐振器的品质因数、温度系数和腔体滤波器的“温漂”指标。图 2 给出了测量介质陶瓷试片的介电常数、品质因数和温度系数的测试系统示意图。

### 3. 结果与讨论

#### 3.1. 物相组成与介电性能

图 3 给出了采用相同煅烧工艺、不同球磨工艺制得  $\text{CaTiO}_3\text{-NdAlO}_3$  介质陶瓷粉体的 XRD 图谱；其中 (a)、(b)和(c)分别对应采用传统行星球磨、双重高能球磨和循环搅拌与高能球磨复合工艺制备样品。从图 3 可见，三种球磨工艺制备样品的物相结构都属于正交钙钛矿晶型，但是传统行星球磨对应样品出现了较为明显的小角衍射杂峰(如图中黑色箭头所示)，而采用高能球磨工艺制备样品的小角衍射峰则基本被淹没。但是，在衍射角为  $47.5^{\circ}$ 附近(图 3 中插图所示)，双重高能球磨工艺制备样品的衍射峰向左偏移，这表明高温合成过程中发生了晶格畸变。因此，循环搅拌与高能球磨复合工艺制得介质陶瓷样品的物相结构为单相正交钙钛矿晶型。

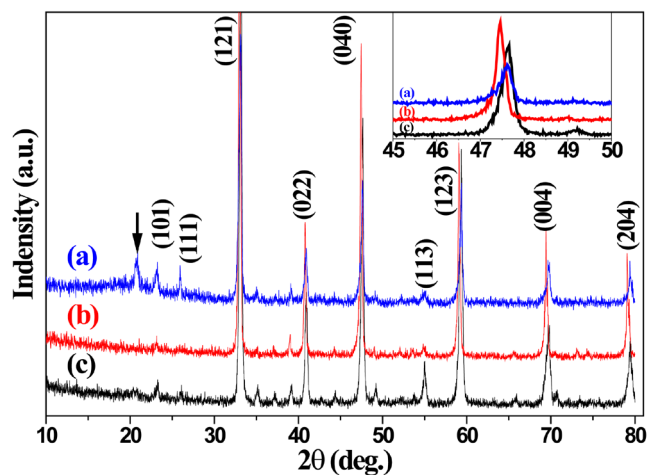
图 4 给出了采用相同烧结工艺、不同球磨工艺制得  $\text{CaTiO}_3\text{-NdAlO}_3$  介质陶瓷样品的 SEM 照片；其中 (a)、(b)和(c)分别对应采用传统行星球磨、双重高能球磨和循环搅拌与高能球磨复合工艺制备的样品。首先，采用 ISO 1183-1:2012 (GB/T 1033.1-2008)标准方法测得上述 3 个陶瓷样品的相对密度分别为 92.7%、94.3 %和 96.5%。其次，从图 4(a)可见传统行星球磨制得粉体烧成的陶瓷晶粒之间存在明显的裂纹和空隙；如图 4(b)所示，双重高能球磨工艺制得粉体烧成的陶瓷晶粒上存在明显的微孔和晶粒间空隙(图 4(b)中插图)。从图 4(c)可见，循环搅拌 - 高能球磨复合工艺制备陶瓷样品的晶粒尺寸显著增大且晶粒间有细小的白色晶粒填充，使其组织紧密、几乎没有明显的空隙和裂纹，因此其致密化程度优于其它两种工艺。

传统筒式低能球磨的陶瓷粉体粒度分布较为分散并且混合不够均匀，因此煅烧之后的陶瓷粉料即前驱体粉料通常会出现晶粒粗化和粉体颗粒粘接、硬化等现象，不利于介质陶瓷后续制备工艺的进行。干法高能球磨和传统筒式低能球磨的不同之处在于研磨介质硬球的运动速度很快，使得粉末产生塑性形变乃至固相形变；如果将两种以上粉末同时放入球磨罐中进行高能球磨，粉末颗粒经压延、压合、碾碎、再压合(冷焊 - 粉碎 - 冷焊)的反复过程，最后获得组织和成分均匀的合金粉末。循环搅拌研磨采用了湿法超细粉体制备技术，循环搅拌过程使陶瓷粉体进一步均匀细化，并且有效避免了干法高能球磨机械合金化



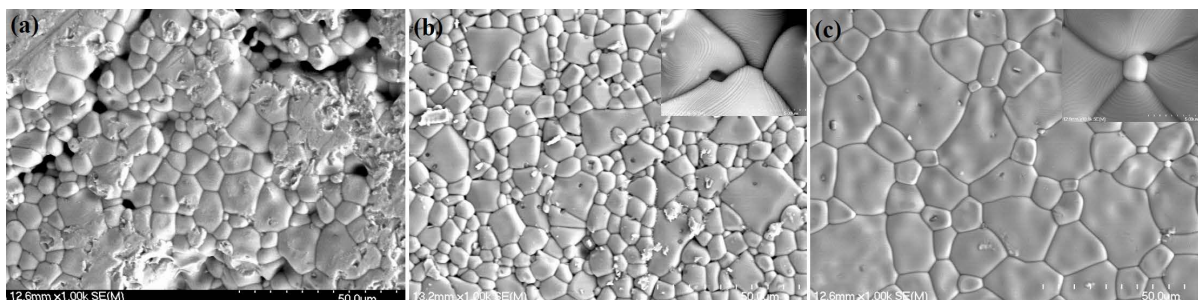
**Figure 2.** Schematic diagrams of the dielectric properties-testing system for  $\text{CaTiO}_3\text{-NdAlO}_3$  ceramic samples

**图 2.**  $\text{CaTiO}_3\text{-NdAlO}_3$  陶瓷样品介电性能测试系统的示意图



**Figure 3.** The XRD spectrums of  $\text{CaTiO}_3\text{-NdAlO}_3$  dielectric ceramic samples prepared by different ball milling processes

**图 3.** 不同球磨工艺制得  $\text{CaTiO}_3\text{-NdAlO}_3$  介质陶瓷粉体的 XRD 图谱



**Figure 4.** The SEM photographs of  $\text{CaTiO}_3\text{-NdAlO}_3$  dielectric ceramic samples prepared by different ball milling processes

**图 4.** 不同球磨工艺制备  $\text{CaTiO}_3\text{-NdAlO}_3$  介质陶瓷样品的 SEM 照片

过程易引入杂质的弊端。因此，采用高能球磨 - 循环搅拌复合型工艺制得  $\text{CaTiO}_3\text{-NdAlO}_3$  介质陶瓷致密化程度优于其它两种工艺。

图 5 给出了图 4(c)中插图所示白色晶粒的 EDS 能谱, 可见其化学成分符合  $0.3\text{NdAlO}_3\text{-}0.7\text{CaTiO}_3$  分子式, 这说明其晶粒内部和晶界处没有发现铝富集型二次相[7]。因此, 采用循环搅拌 - 高能球磨法制备样品的晶体结构为单相正交钙钛矿晶型, 这与图 3 所示的 XRD 图谱完全相符。

采用图 2 所示的测试方法测得图 4(a)、图 4(b)和图 4(c)对应介质陶瓷试片的介电常数( $\epsilon$ )分别为 42.5、47.3 和 45.1; 温度系数( $\tau_f$ )分别为  $26.7 \times 10^{-6}/\text{K}$ 、 $14.5 \times 10^{-6}/\text{K}$  和  $1.39 \times 10^{-6}/\text{K}$ 。由此可见, 高能球磨和循环搅拌复合工艺制得陶瓷粉体烧成介质陶瓷的介电性能满足同时具备较高介电常数与极低温度系数的微波器件用谐振元件的技术要求。

### 3.2. 微波器件性能分析

图 6 为基于高能球磨和循环搅拌复合型工艺制得  $\text{CaTiO}_3\text{-NdAlO}_3$  介质陶瓷, 小批量试制的 TM 模介质陶瓷谐振器及其端面烧成导电膜层(银导电浆料)进行焊接性能测试的样品示意图。从图 6 可见, 经过 GB/T 2423.28-2005 标准方法测试的焊接样品, 其导电膜层无氧化锈蚀现象且陶瓷谐振器本身也没有发生破损和开裂等现象, 因此采用高能球磨和循环搅拌复合型工艺制得  $\text{CaTiO}_3\text{-NdAlO}_3$  介质陶瓷满足微波元件的可焊接性技术要求。

图 7 给出了上述批量试制的 TM 模介质陶瓷谐振器的单腔测试系统及其品质因数(测试中心频率为 850 MHz)。结果表明, 基于高能球磨和循环搅拌复合型工艺制得  $\text{CaTiO}_3\text{-NdAlO}_3$  介质陶瓷的 TM 模介质陶瓷谐振器品质因数值接近 4000。

图 8 给出了采用上述介质陶瓷和常规金属谐振器的混合结构集成组装的腔体滤波器及其“温飘”性能测试曲线。从图 8 可见, 该腔体滤波器的通带频率在不同温度下相对中心频率的漂移量仅为 1.25~2.07 MHz (插损 < 20 dB), 完全满足通讯基站用 TM 模腔体滤波器的技术要求(中心频率为 850~930 MHz, “温漂”指标为 1.00~2.50 MHz (插损 < 20 dB))。

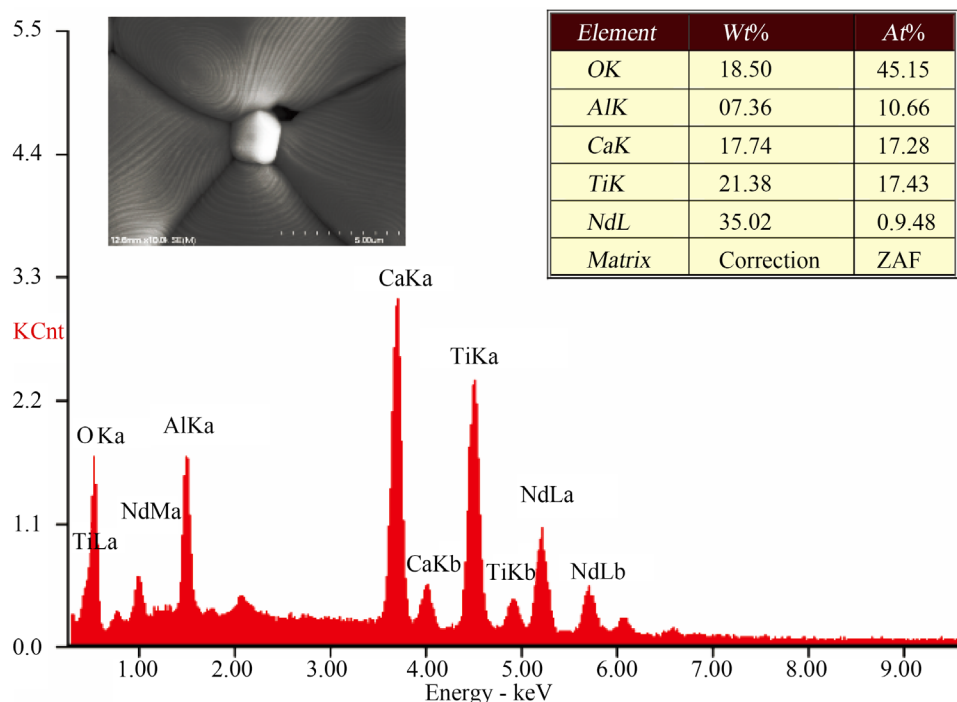
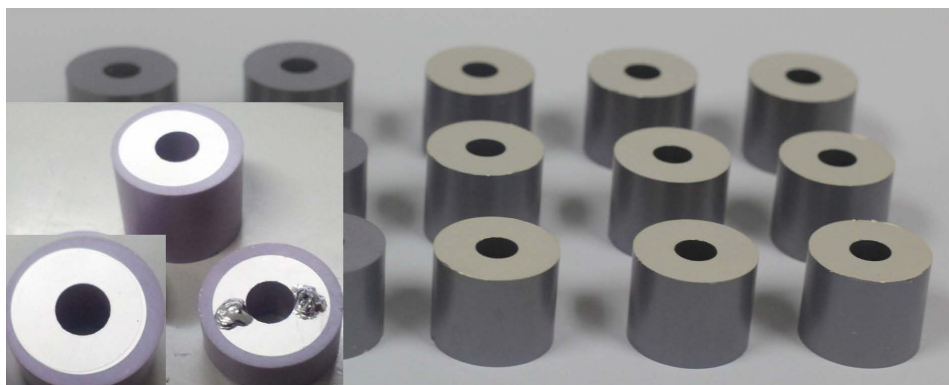


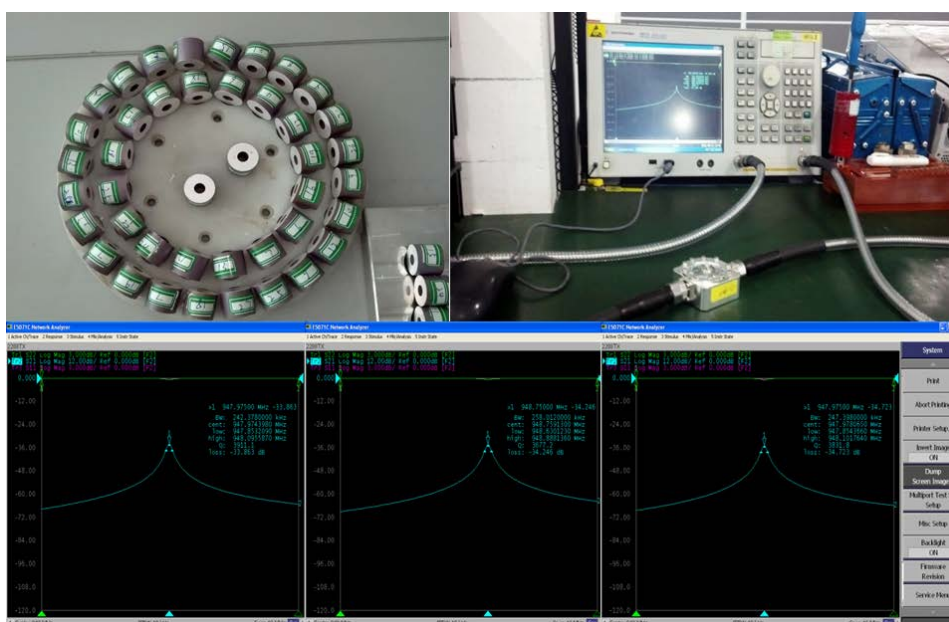
Figure 5. The EDS spectrum of white ceramic grain in the insert picture as shown in Figure 4

图 5. 图 4 中插图所示白色陶瓷晶粒的 EDS 能谱



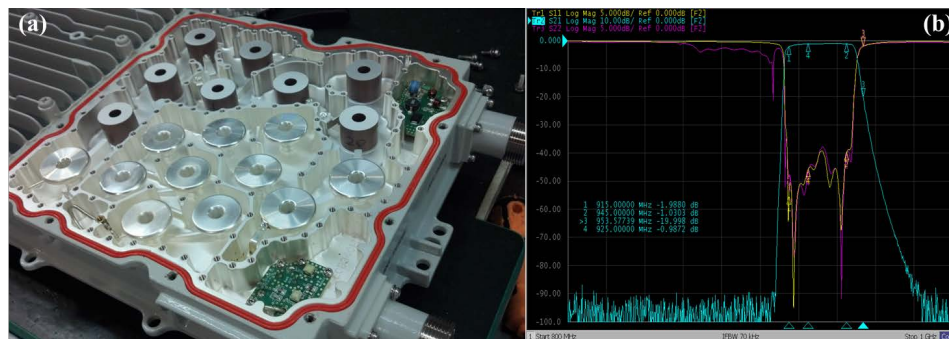
**Figure 6.** TM mode dielectric ceramic microwave resonator samples and the conductive film after welding test (insert)

**图 6.** TM 模介质陶瓷微波谐振器样品及导电膜层焊接性能测试后图片(插图)



**Figure 7.** TM mode dielectric ceramic microwave resonator samples and test results for quality factor (Q)

**图 7.** TM 模介质陶瓷微波谐振器样品及其品质因数的测量结果



**Figure 8.** TM mode cavity filter integrated by dielectric ceramic and metal resonator and its "temperature drift" test curves

**图 8.** 介质陶瓷与金属谐振器集成 TM 模腔体滤波器及其“温飘”测试曲线

图 9 给出了基于高能球磨和循环搅拌复合型工艺制得  $\text{CaTiO}_3\text{-NdAlO}_3$  介质陶瓷批量试制的 TE 模介质陶瓷谐振器的单腔测试系统及品质因数(测试中心频率为 850 MHz)。结果表明, 基于高能球磨和循环搅拌复合型工艺制得  $\text{CaTiO}_3\text{-NdAlO}_3$  介质陶瓷的 TE-01 模介质陶瓷谐振器品质因数可达 22,000。

图 10 给出了采用上述 TE 模介质陶瓷谐振器集成组装的十三阶六个对称传输点 TE-01 模腔体滤波器设计结构和实物及其“温飘”性能模拟与实际测试曲线。其中, (a)为 TE01 模腔体滤波器全腔 3D 仿真设计模拟图; (b)为介质谐振器集成的腔体滤波器结构件实物照片; (c)仿真设计介质滤波器的 S 参数响应曲线; (d)为(b)所示腔体滤波器的微波介电性能实测曲线。从图 10(c)和图 10(d)可见, S 参数响应曲线的波形在仿真和实测数据上都体现了其交叉耦合的正确性; 并且, 该腔体滤波器通带频率在不同温度下相对中心频率的漂移量仅为 0.25~0.37 MHz (插损 < 90 dB), 这完全满足通讯基站用 TE 模腔体滤波器的技术要求(中心频率为 2350 MHz, “温漂”指标为 0.20~0.40 MHz (插损 < 90 dB))。

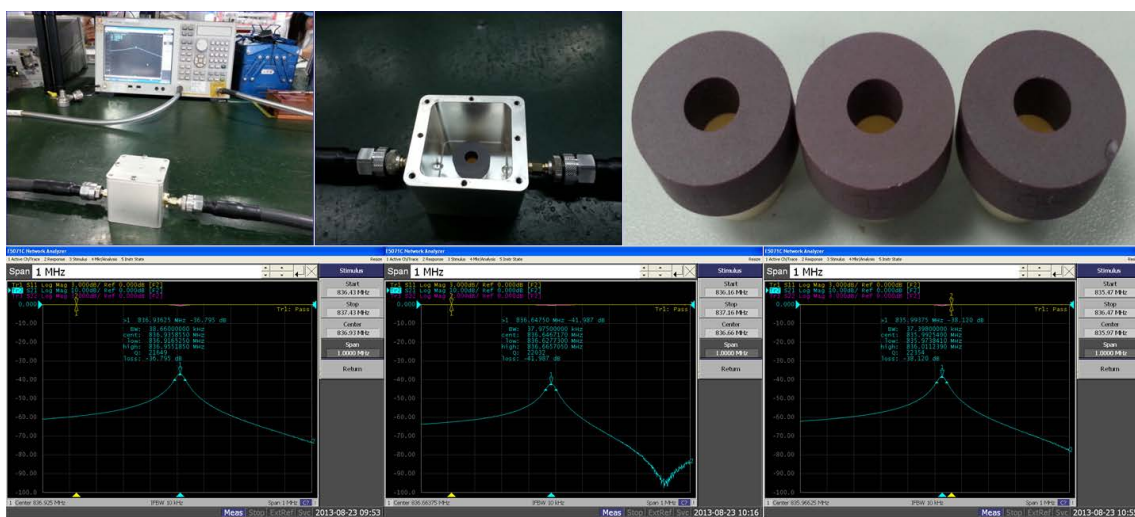


Figure 9. TE mode dielectric ceramic microwave resonator samples and test results for quality factor (Q)

图 9. TE 模介质陶瓷微波谐振器样品及其品质因数的测量结果

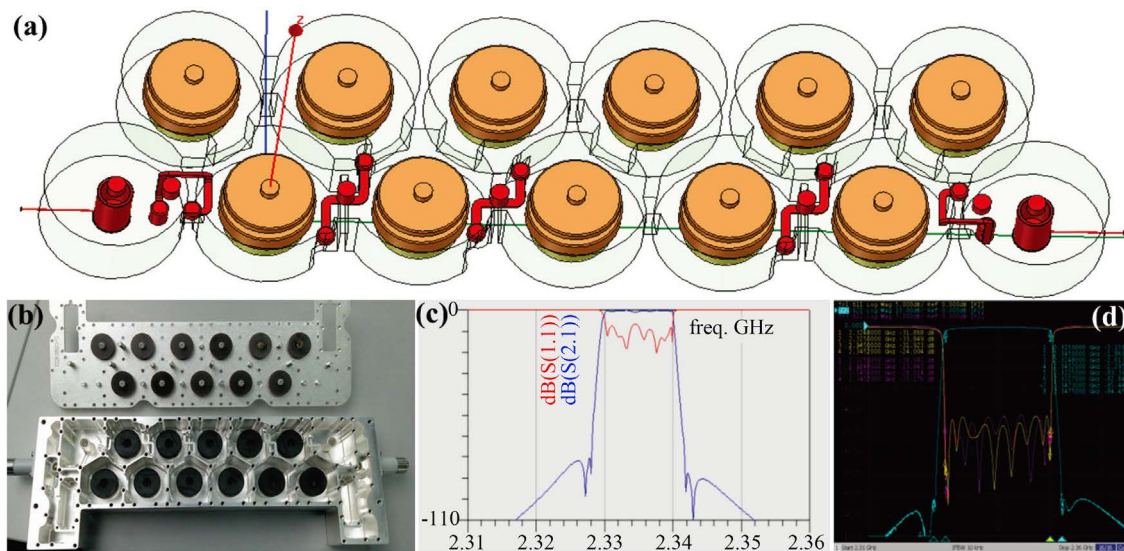


Figure 10. TE-01 mode cavity filter integrated by dielectric ceramic resonators and its “temperature drift” test curves

图 10. 介质陶瓷与金属谐振器集成 TE-01 模腔体滤波器及其“温飘”测试曲线



## 4. 结论

本文采用干法高能球磨和循环搅拌湿法研磨相结合的陶瓷粉体制备工艺, 并通过固相反应烧结法制备了高性能  $\text{CaTiO}_3\text{-NdAlO}_3$  介质陶瓷材料, 系统分析了  $\text{CaTiO}_3\text{-NdAlO}_3$  介质陶瓷的物相组成、微观结构和微波介电性能, 并讨论了基于该介质陶瓷谐振元件集成组装 TM 和 TE 模腔体滤波器的通带频率稳定性, 得出如下结论:

1) 循环搅拌 - 高能球磨法制备  $\text{CaTiO}_3\text{-NdAlO}_3$  介质陶瓷粉体的物相结构为单相正交钙钛矿晶型。

2) 循环搅拌 - 高能球磨复合型工艺制得  $\text{CaTiO}_3\text{-NdAlO}_3$  介质陶瓷的组织紧密、几乎没有明显的空隙和裂纹, 其致密化程度高于传统行星球磨和双重高能球磨工艺并具备优异的介电性能。

3)  $\text{CaTiO}_3\text{-NdAlO}_3$  介质陶瓷制得微波谐振器及其组装的腔体滤波器的“温漂”指标均满足通讯基站用微波谐振元件和腔体滤波器的技术要求。

## 基金项目

本研究工作获得广东省普通高校特色创新项目资助(No. 2016KTSCX095)。

## 参考文献

- [1] Jancar, B., Suvorov, D., Valant, M. and Drazic, G. (2003) Characterization of  $\text{CaTiO}_3\text{-NdAlO}_3$  Dielectric Ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*, **23**, 1391-1400. [https://doi.org/10.1016/S0955-2219\(02\)00359-X](https://doi.org/10.1016/S0955-2219(02)00359-X)
- [2] Kipkoech, E.R., Azough, F., Freer, R., Leach, C., Thompson, S.P. and Tang, C.C. (2003) Structural Study of  $\text{Ca}_{0.7}\text{Nd}_{0.3}\text{Ti}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{O}_3$  Dielectric Ceramics Using Synchrotron X-Ray Diffraction. *Journal of the European Ceramic Society*, **23**, 2677-2682. [https://doi.org/10.1016/S0955-2219\(03\)00148-1](https://doi.org/10.1016/S0955-2219(03)00148-1)
- [3] Freer, R. and Azough, F. (2008) Microstructural Engineering of Microwave Dielectric Ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*, **28**, 1433-1441. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2007.12.005>
- [4] Reaney, I.M. and Iddles, D. (2006) Microwave Dielectric Ceramics for Resonators and Filters in Mobile Phone Networks. *Journal of the American Ceramic Society*, **89**, 2063-2072.
- [5] 王利青, 刘亚云.  $\text{CaTiO}_3\text{-LaAlO}_3$  微波介质陶瓷的研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2014, 33(1): 103-106.
- [6] 褚夫同, 郑兴华, 张国清, 汤德平, 张肖峰.  $\text{MTiO}_3\text{-LnAlO}_3$  (M: Ba, Sr, Ca; Ln: La, Nd, Sm)系微波介质陶瓷的研究进展[J]. 材料导报, 2008, 22(专辑 XI): 325-328.
- [7] 童启铭, 钟朝位, 李攀敏, 庞翔, 肖勇.  $\text{NdAlO}_3\text{-CaTiO}_3$  微波介质陶瓷材料的研究[J]. 电子元件与材料, 2011, 30(9): 1-4.
- [8] 李玉平, 沈冠群, 袁昂, 陈功田. 添加  $\text{B}_2\text{O}_3$  对  $0.7\text{CaTiO}_3\text{-0.3NdAlO}_3$  陶瓷烧结及其介电性能的影响[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2014, 41(7): 40-44.
- [9] 赵文, 甘国, 严继, 杜景, 张家敏, 刘意春, 易健宏, 康昆勇. ZnO 掺杂对  $0.7\text{CaTiO}_3\text{-0.3NdAlO}_3$  介质陶瓷低温烧结及介电性能的影响[J]. 人工晶体学报, 2015, 44(2): 435-440.
- [10] 曹良足, 彭华仓, 严君美, 吴坚强.  $\text{CaTiO}_3\text{-(La,Nd)AlO}_3$  微波介质陶瓷的研究与应用[J]. 电子元件与材料, 2013, 32(8): 35-37.
- [11] Reda, A.E., Ibrahim, D.M. and Abdel Aziz, D.A. (2009) Microwave Dielectric Properties of  $(1-x)\text{CaTiO}_3\text{-xNa}_{0.5}\text{Nd}_{0.5}\text{TiO}_3$  Ceramics. *Journal of Materials Science*, **44**, 6247-6250.
- [12] Liang, F., Ni, M., Lu, W.Z. and Fan, G.F. (2013) Microwave Dielectric Properties and Crystal Structures of  $0.7\text{CaTiO}_3\text{-0.3}[\text{LaxNd}(1-x)]\text{AlO}_3$  Ceramics. *Journal of Alloys and Compounds*, **568**, 11-15. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.03.059>
- [13] Cheng, L.J., Liu, L., Ma, Q. and Liu, S.J. (2016) Relationship between Densification Behavior and Stabilization of Quasi-Liquid Grain Boundary Layers in CuO-Doped  $0.7\text{CaTiO}_3\text{-0.3NdAlO}_3$  Microwave Ceramics. *Scripta Materialia*, **111**, 102-105. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2015.08.025>
- [14] Cheng, L.J., Jiang, S.W., Ma, Q., Shang, Z.G. and Liu, S.J. (2016) Sintering Behavior and Microwave Properties of Dense  $0.7\text{CaTiO}_3\text{-0.3NdAlO}_3$  Ceramics with Sub-Micron Sized Grains by Spark Plasma Sintering. *Scripta Materialia*, **115**, 80-83. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2016.01.003>

**知网检索的两种方式：**

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2160-7613，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：[ms@hanspub.org](mailto:ms@hanspub.org)