

Development Of $\text{Ba}_2\text{Ti}_9\text{O}_{20}$ and $(\text{Zr}_{0.8}\text{Sn}_{0.2})\text{TiO}_4$ Microwave Ceramics

A dissertation submitted for the degree of Master of Science

By

Jiaorong Huang

Supervisor:

Professor Zhaoxian Xiong

July, 2003

Department of Chemistry, Xiamen University

摘 要

微波介质陶瓷是使用在微波频率下的陶瓷（300MHz~3000GHz），它主要应用于制作微波谐振器和滤波器，一般要求具有较高的相对介电常数 ϵ_r 、高的品质因子 Q 和趋于零的频率温度系数 τ_f 。为达到此目的，本论文对 BaO-TiO₂ 和 (Zr,Sn)TiO₄ 体系陶瓷进行研究，并对其介电极化机理进行初步的探讨。

在 BaO-TiO₂ 体系中,考察了不同原料配比、不同制备工艺和添加剂 SnO₂ 对 Ba₂Ti₉O₂₀ 相的形成及其微波性能的影响。实验表明：在不加任何添加剂的情况下也能形成 Ba₂Ti₉O₂₀；SnO₂ 能促进 Ba₂Ti₉O₂₀ 相的形成；采用水热法制备的 Ba₂Ti₉O₂₀ 陶瓷微波性能比传统的固相法制备的 Ba₂Ti₉O₂₀ 陶瓷微波性能好；当 Ba / Ti \approx 2 / 9 时，该体系陶瓷的微波性能最好。

在 (Zr,Sn)TiO₄ 体系中，研究了 MnCO₃ 和 Bi₂O₃ 对 (Zr_{0.8}Sn_{0.2})TiO₄ 陶瓷的烧结温度及微波性能的影响。研究表明：单独使用 MnCO₃ 或 Bi₂O₃ 添加剂，虽然能降低 (Zr_{0.8}Sn_{0.2})TiO₄ 陶瓷的烧结温度，但同时也会恶化 (Zr_{0.8}Sn_{0.2})TiO₄ 陶瓷的微波性能；当同时使用一定量的 MnCO₃ 和 Bi₂O₃ 添加剂，不仅能有效降低 (Zr_{0.8}Sn_{0.2})TiO₄ 陶瓷的烧结温度,而且能保持 (Zr_{0.8}Sn_{0.2})TiO₄ 陶瓷良好的微波性能。

在上述两类陶瓷材料合成制备的基础上,本文对 Ba₂Ti₉O₂₀ 陶瓷的极化机理进行初步的探讨,从理论上估算 Ba₂Ti₉O₂₀ 陶瓷的相对介电常数并与实验结果对照分析；同时探讨影响微波介电常数的诸因素，为进一步的研究提供一定的基础。

[关键词] 微波介质陶瓷 Ba₂Ti₉O₂₀ (Zr_{0.8}Sn_{0.2})TiO₄

Abstract

Microwave dielectric ceramic (MWDC) is usually applied in microwave frequency, 300MHz~3000GHz. It is mainly used as dielectric resonator and filters. It is expected for MWDC to have a high quality factor Q , a high dielectric constant ϵ_r and a low temperature coefficient of resonant frequency τ_f . The systems of BaO-TiO₂ and (Zr,Sn)TiO₄ ceramics and their polarization mechanisms are therefore studied in this thesis.

In the system of BaO-TiO₂, the effects of compositions, additive of SnO₂, synthesis methods and preparation conditions of ceramics on the formation of Ba₂Ti₉O₂₀ were investigated. Without any additive Ba₂Ti₉O₂₀ phase has been obtained. SnO₂ is in favor of the formation of Ba₂Ti₉O₂₀. The MWDC synthesized by the hydrothermal synthesis behaves better microwave properties than that prepared by conventional solid reaction method.

In the system of (Zr,Sn)TiO₄, the effects of MnCO₃ and Bi₂O₃ on the (Zr_{0.8}Sn_{0.2})TiO₄ were studied. Additives of MnCO₃ and Bi₂O₃ were effective for densification of the ceramics. The microwave properties of (Zr_{0.8}Sn_{0.2})TiO₄ with any one of these two additives were deteriorated. However the microwave properties of (Zr_{0.8}Sn_{0.2})TiO₄ were not influenced when MnCO₃ and Bi₂O₃ additives were used at the suitable amount.

On the basis of synthesis and preparation for MWDC material, the polarization mechanism of Ba₂Ti₉O₂₀ was discussed. The dielectric constant of Ba₂Ti₉O₂₀ was calculated by theoretical method. The factors which have influence on the dielectric constant of ceramics were also analyzed based on the experiments.

[Key words] Microwave Dielectric Ceramics, Ba₂Ti₉O₂₀, (Zr_{0.8}Sn_{0.2})TiO₄

目 录

摘要.....	I
Abstract.....	II
第一章 绪 论.....	1
§ 1.1 引言.....	1
§ 1.2 微波陶瓷的应用及研究现状.....	2
§ 1.3 微波陶瓷的介电性能.....	11
§ 1.4 常见微波陶瓷的测试方法.....	14
§ 1.5 本课题研究的主要内容.....	19
第二章 微波陶瓷的制备工艺与表征.....	20
§ 2.1 微波陶瓷的制备工艺.....	20
§ 2.2 微波陶瓷的表征与测试.....	23
第三章 BaO-TiO₂系中 Ba₂Ti₉O₂₀微波陶瓷的研制.....	27
§ 3.1 固相法合成 Ba ₂ Ti ₉ O ₂₀ 陶瓷及微波性能研究.....	27
3.1.1 引言.....	27
3.1.2 实验过程.....	28
3.1.3 实验结果与讨论.....	29
1. 不同预烧温度对 Ba ₂ Ti ₉ O ₂₀ 相合成的影响.....	29
2. 样品的热分析.....	31
3. 掺杂 SnO ₂ 对 BaTi ₉ O ₂₀ 相形成的影响.....	33
4. Ba ₂ Ti ₉ O ₂₀ 陶瓷的微观结构.....	34
5. 掺杂 SnO ₂ 对晶胞参数的影响.....	35
6. Ba ₂ Ti ₉ O ₂₀ 陶瓷的微波性能.....	35

§ 3.2 水热法合成 $\text{Ba}_2\text{Ti}_9\text{O}_{20}$ 陶瓷及微波性能研究.....	37
3.2.1 引言.....	37
3.2.2 实验过程.....	37
3.2.3 实验结果与讨论.....	38
1. 不同反应时间对 $\text{Ba}_2\text{Ti}_9\text{O}_{20}$ 相合成的影响.....	38
2. 不同预烧温度对 $\text{Ba}_2\text{Ti}_9\text{O}_{20}$ 相合成的影响.....	39
3. 样品的热分析.....	41
4. 掺杂 SnO_2 对 $\text{Ba}_2\text{Ti}_9\text{O}_{20}$ 相形成的影响.....	42
5. $\text{Ba}_2\text{Ti}_9\text{O}_{20}$ 陶瓷的微观结构.....	43
6. $\text{Ba}_2\text{Ti}_9\text{O}_{20}$ 陶瓷的介电性能.....	44
§ 3.3 小结	48
第四章 $(\text{Zr}_{0.8}\text{Sn}_{0.2})\text{TiO}_4$ 微波陶瓷的研制.....	49
§ 4.1 引言.....	49
§ 4.2 实验过程.....	50
§ 4.3 实验结果与讨论.....	51
4.3.1 MnCO_3 对 $(\text{Zr}_{0.8}\text{Sn}_{0.2})\text{TiO}_4$ 微波陶瓷的影响.....	51
4.3.2 Bi_2O_3 对 $(\text{Zr}_{0.8}\text{Sn}_{0.2})\text{TiO}_4$ 微波陶瓷的影响.....	56
4.3.3 MnCO_3 和 Bi_2O_3 对 $(\text{Zr}_{0.8}\text{Sn}_{0.2})\text{TiO}_4$ 微波陶瓷的影响.....	57
§ 4.4 小结.....	63
第五章 $\text{Ba}_2\text{Ti}_9\text{O}_{20}$ 微波陶瓷的极化机理初探.....	64
结 论.....	65
参考文献.....	66
致 谢.....	70

厦门大学博硕士学位论文摘要库

第一章 绪 论

§1.1 引 言

微波通常是指频率为 300MHz 至 300GHz 范围内的电磁波。在真空中，其相应的波长为 1m 至 0.1mm。通常将微波分为分米波、厘米波、毫米波和亚毫米四个波段^[1]，如表 1.1 所示。

表 1.1 微波频段的划分

频段名称	频率范围	波段范围	波长范围
特高频 (UHF)	300MHz~3GHz	分米波	$(10\sim 1) \times 10^{-1}\text{m}$
超高频(SHF)	3GHz~30GHz	厘米波	$(10\sim 1) \times 10^{-2}\text{m}$
极高频(EHF)	30GHz~300GHz	毫米波	$(10\sim 1) \times 10^{-3}\text{m}$
超级高频(SEHF)	300GHz~3000GHz	亚毫米波	$(10\sim 1) \times 10^{-4}\text{m}$

与普通的无线电波相比，微波的波长短，方向性极强，有利于微弱信号的接收，很适用于雷达发现和跟踪目标；微波的频率高，可用频带宽，信息容量大，在 300MHz~300GHz 范围内包含的可使用波段数是在 0~3000MHz 的长、中、短波范围内所包含的可使用波段数的 10000 倍，而且微波能穿透高空的电离层，特别有利于宇宙通讯和卫星通讯等^[2]。鉴于微波的这些特点，微波技术在通信领域有着广阔的应用前景。

随着科技的迅速发展，无绳电话、高清晰度电视、电视电话及多种形式的私人通信正在逐渐走入人们的生活，而微波介质陶瓷作为制造微波介质滤波器

和谐振器的关键材料，以其低廉的制作成本，越来越受到人们的重视，其研究也得到了迅速的发展。

§1.2 微波陶瓷的应用及研究进展

1.2.1 微波介质陶瓷的应用

微波介质陶瓷在微波电路中的应用，主要有两种形式^[3]。

一是用作微波电路中的结构器件，如 MIC 基片，微波元器件的支撑件等，主要起着微波器件的承载、支撑、绝缘等作用。利用电介质基片可以制成以微波线路为主的传输线路及利用其线路波长的谐振器、耦合器等。

二是用作微波电路中的功能器件，如起着电路或元件之间的耦合及储能作用的电容器，起着集中吸收储存电磁波能量的介质天线，起着引导电磁波沿一个方向传播作用的介质波导以及介质谐振器。

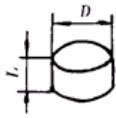
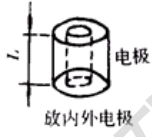

其中介质谐振器是微波介质陶瓷在微波电路中最主要的应用。与金属空腔谐振器相比，介质谐振器有以下特点^[3]：（1）体积小，其体积约为金属空腔谐振器的 $1/\sqrt{\epsilon_r}$ ；（2）可以实现器件的高稳定性，谐振频率温度系数 τ_f 可达 ppm/°C 数量级；（3）Q 值高；（4）谐振频率容易调节；（5）容易激励，同其它线路耦合简单。

微波介质陶瓷在谐振器中应用的设想是由美国的 R.D. Richtmeyer^[4]于 1939 年提出来的。最近 20 年来，美国、日本和德国已先后开展了微波介质陶瓷的应用研究工作，使一些微波介质谐振器实现了商品化^{[5][6]}，如美国在 1979 年 12 月完成了实用化的 800MHz 汽车电话，1984 年 5 月开始使用 12GHz 卫星直播，其微波通信设备上都使用了微波介质材料作的介质谐振器。在应用研究过程中，对微波介质谐振器在结构设计上也相应进行了大量的工作，现将已开发应用的

介质谐振器类型、工作模式及结构归纳于表 1.2^[7]。

微波介质陶瓷不仅广泛应用于通信系统，还越来越多应用到文娱电子、自动工程、控制与安全系统等众多领域。

表 1.2 各类谐振器的特点及其应用

类型	模式	形状	尺寸	适用频率	应用
(1) 介质谐振器	TE _{01d}		$D \approx C/f \sqrt{\epsilon_r}$ $L/D=0.4$ L, D 单位为 mm $C: 3 \times 10^{11} \text{ mm/s}$ f : 谐振频率, 单位 Hz	SHF 频率 ($< 3 \text{ GHz}$)	卫星广播 卫星通信 地面通信
(2) 同轴谐振器	TEM	 电极 放内外电极	$L \approx \frac{(C) \text{ mm/s}}{4(f) \text{ Hz} \sqrt{\epsilon_r}}$ L, C, f 意义、单位同上	UHF 频带 ($< 2 \text{ GHz}$)	移动无线电话机 汽车电话机 便携式电话机 共用天线电视
(3) 带状线路 谐振器	TEM	 $\frac{\lambda}{2}$ 形 $\frac{\lambda}{4}$ 形 接地导体	$L \approx \frac{(C) \text{ mm/s}}{2(f) \text{ Hz} \sqrt{\epsilon_w}}$ $L \approx \frac{(C) \text{ mm/s}}{4(f) \text{ Hz} \sqrt{\epsilon_w}}$ $\epsilon_w = (0.6 \sim 0.9) \epsilon_r$	UHF 频带 SHF 频带	振荡扫描器 压控振荡器 SHF 变频器

1.2.2 微波介质陶瓷的研究进展

早在 1939 年, Richtmyer^[4]就从理论上提出了介质陶瓷材料可作谐振器的可能性^[4], 但只是在微波集成电路的发展迫切需要小尺寸的振荡元件时, 人们才对介质谐振器提出了实际要求。1960 年, A.Okaya^[8]提出了应用介质谐振器使微波滤波器小型化的方案, 尝试用高介电常数和低损耗的 TiO₂ 单晶(金红石相)来制作小型化的介质谐振器, 但 TiO₂ 的谐振频率太大 ($\tau_f = +450 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$), 热稳定性远不能满足微波应用的要求。1968 年, S.B.Cohn^[9]等人又试着用 TiO₂ 陶瓷制作微波滤波器, 但最终也因 τ_f 过高未能实用化。这就促使人们研究小的 τ_f 值、介电性能优良的微波介质陶瓷材料, 从而导致了新的微波陶瓷的发展。

1974年, H.M.O'Bryan^[10]从 BaO-TiO₂系中发现了具有高 ϵ_r 、高 Q 值和低 τ_f 的微波介质陶瓷, 其中主要是 BaTi₄O₉ 和 Ba₂Ti₉O₂₀ 陶瓷, 微波介质陶瓷开始进入实用化; 1976年, 日本的 Wakino^[11]等人合成了 τ_f 为 0 ppm/°C 的单相 (Zr,Sn)TiO₄ 陶瓷, 并发展成为一类具有高 ϵ_r 、高 Q 值和低 τ_f 的实用微波介质陶瓷。为了获得很高的 ϵ_r 的微波陶瓷, 人们在 BaO-TiO₂ 系中添加稀土氧化物, 开发出了 ϵ_r 达 70~90 的 BaO-Ln₂O₃-TiO₂ 系的微波介质陶瓷。八十年代以来, 人们对钙钛矿型 ABO₃ 化合物的 B 位置有两种元素构成的复合钙钛矿型化合物进行了广泛的研究, 发现一系列具有高 Q 的微波介质陶瓷^{[12][13]}, 如 Ba(Zn,Ta)O₃、Ba(Mg,Ta)O₃ 和 Ba(Zn,Nb)O₃ 等, 从而使微波介质陶瓷的应用迈向更高的微波频率。

进入九十年代, 微波介质陶瓷又有了新的发展, 为了配合微波电路的混合集成化, 又开发了一系列低温烧结(烧结温度低于 1000°C)的新型微波介质陶瓷, 其中主要有铋系陶瓷材料^[14]。同时在材料的微波性能方面, 日本制备出 $\epsilon_r=110$, $Q=1200$, $\tau_f < 30$ ppm/°C 的陶瓷, 其主要成分是 Pb、Zn、Ca 氧化物。由于日本人从铅钙钛矿系中的铁电体与反铁电体中开发出了许多性能优良的微波介质陶瓷, 从而突破了铁电体与反铁电体不可能具有优良微波性能的传统观念, 这不仅扩大微波介质陶瓷的研究范围, 也将对微波介质陶瓷理论产生深远的影响。

虽然目前所报道的研究系统较多, 但归纳起来, 主要集中在如下 5 个体系, ① BaO-TiO₂; ② 复合钙钛矿 A(B_{1/3}B''_{2/3})O₃ 系 (A=Ba,Sr; B=Mg,Zn,Co,Ni,Mn; B''=Nb,Ta); ③ 铅基钙钛矿系; ④ BaO-Ln₂O₃-TiO₂ (Ln=La,Pr,Nd,Sm,Eu,Gd) 系 ⑤ (Zr,Sn)TiO₄ 等。下面就上述各个体系进行具体分析。

1. BaO-TiO₂ 系

BaO-TiO₂ 体系中含有多种化合物, 如 BaTiO₃、BaTi₄O₉、BaTi₅O₁₁ 和 Ba₂Ti₉O₂₀, 其中 Ba₂Ti₉O₂₀ 的微波介电性能最好。1958 年 Joker 和 Kwstro^[15] 首次发现了 Ba₂Ti₉O₂₀ 相, 并认为只有在 ZrO₂ 或 SnO₂ 存在的情况下才能获得稳定的 Ba₂Ti₉O₂₀ 相; 后来 H.M.O'Bryan 对 Ba₂Ti₉O₂₀ 进行了深入广泛的研究^{[16][17]}, 发现 Ba₂Ti₉O₂₀ 陶瓷在微波下具有优异的介电性能, 其微波性能为介电常数 $\epsilon_r=39.8$ 、品质因子 $Q=8000$ ($f=4$ GHz)、谐振频率温度系数 $\tau_f=2\text{ppm}/^\circ\text{C}$, 因此引起人们对 Ba₂Ti₉O₂₀ 陶瓷的广泛兴趣。以后的研究表明, 单相的 Ba₂Ti₉O₂₀ 陶瓷的合成是相当困难的, 它必须严格控制配方和工艺条件。O'Bryan^[18] 等人研究表明, 不加 ZrO₂ 或 SnO₂ 等也能获得 Ba₂Ti₉O₂₀ 相, 但在预烧阶段要形成一定量的 Ba₂Ti₉O₂₀, 才能在烧结时形成大量的 Ba₂Ti₉O₂₀ 相。Henning^[19] 等人也证实了如果预烧在 1170 $^\circ\text{C}$ 下, 由于预烧没能合成部分的 Ba₂Ti₉O₂₀ 相, 烧结时只能形成大量的 BaTi₄O₉ 相和少量的 Ba₂Ti₉O₂₀ 相。1992 年喻家庆^[20] 等人研究表明, BaO-TiO₂ 系中添加少量的 SnO₂ 也很难产生大量的 Ba₂Ti₉O₂₀ 相, 还必须添加少量的 Al₂O₃ 才能合成大量的 Ba₂Ti₉O₂₀; 后来 O'Bryan 等研究了 Ba₂Ti₉O₂₀ 附件的相图^[21], 发现 Ba₂Ti₉O₂₀ 相线在 1200 $^\circ\text{C}$ 以上向富钛区弯曲, 呈一定的曲线形状, 这可能是单相 Ba₂Ti₉O₂₀ 陶瓷不易形成的主要原因。O'Bryan 的实验表明: 单相的 Ba₂Ti₉O₂₀ 只存于 Ba:Ti=2:9 附件很窄的一个组分区域里。BaO-TiO₂ 系富钛区相图及 Ba₂Ti₉O₂₀ 附近相图如图 1-1、1-2 所示。

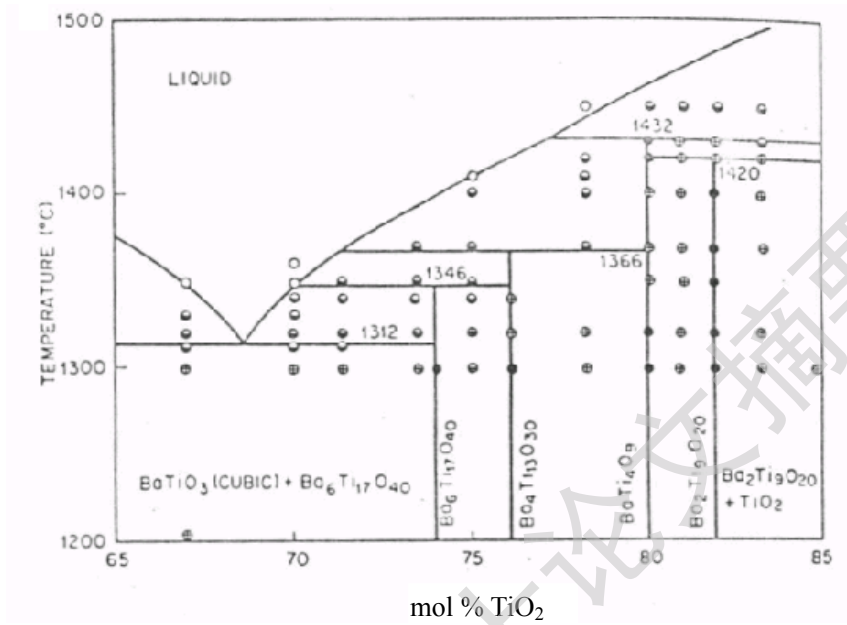


图 1-1 BaO-TiO₂ 系相图

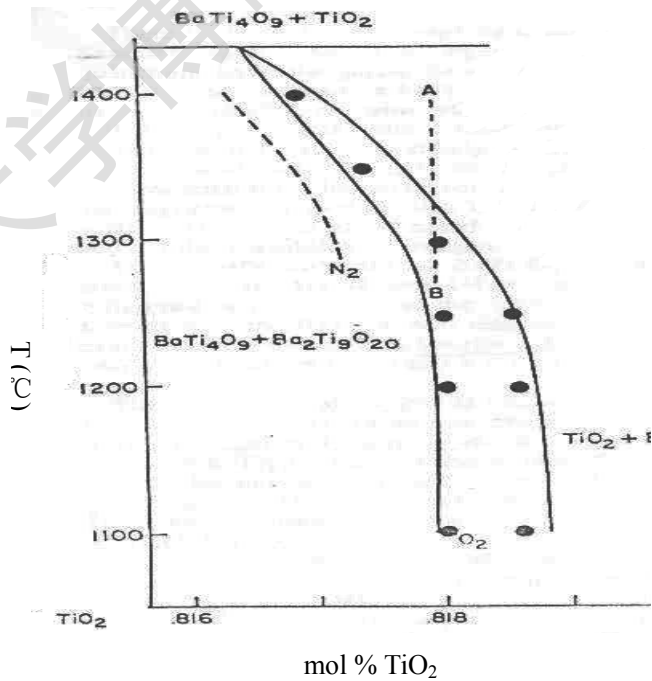


图 1-2 Ba₂Ti₉O₂₀ 附近的相图

2. BaO-Ln₂O₃-TiO₂ 系

BaO-Ln₂O₃-TiO₂ 系是目前在微波陶瓷研究中人们开展工作较多的系统之一，其中 Ln 为镧系稀土元素，如 La, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd 等。以 BaO-Ln₂O₃-TiO₂ 为基础，通过掺杂、改变各组份比例可得到一系列的陶瓷材料，这些陶瓷材料在各微波频段内的电学性能有所不同，工艺过程的难易程度也不一样。图 1-1、1-2 是镧系各元素制备的 BaO-Ln₂O₃-TiO₂ 陶瓷的微波性能^[22]。

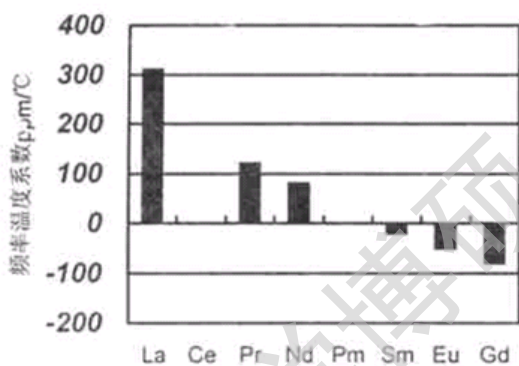


图 1-3 Ln 系各元素的频率温度系数

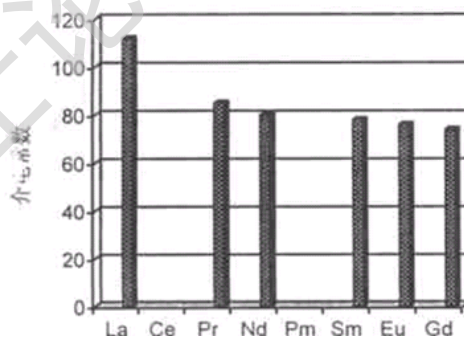


图 1-4 Ln 系各元素的介电常数

从图 1-3、1-4 可以看出，BaO-Ln₂O₃-TiO₂ 系陶瓷都有较高的介电常数，La、Pr、Nd 有正的温度系数，而 Sm、Eu、Gd 有负的温度系数。通常研究较多的混合镧系组份为 Ba-Nd-Sm-Ti 陶瓷，主要考虑的是它们的温度补偿效应，可制备出频率温度系数为 0ppm/°C 的微波陶瓷。国内外对此组份的研究都较多。陈湘明等报道的此体系微波陶瓷介电常数为 100~210(专利公告号:1232801)，具有低损耗与较小的谐振频率温度系数，比国外报道的此系统的介电常数值要高。

3. 复合钙钛矿系

在厘米、毫米波段使用的通信系统要求介电材料在高频(大于 10GHz)时有很高的 Q 值。具有复合钙钛矿结构 $A(B_{1/3}B''_{2/3})O_3$ ($A=Ba, Sr; B=Mg, Zn, Co, Ni, Mn; B''=Nb, Ta$) 的材料, 在很高的微波频率下有极低的介质损耗, 因此对它的研究日益受到重视。以 BMT-BaSnO₃、BZT-BaZrO₃、BZT-BZN 为主晶相的微波介质陶瓷成为使用频率和品质因数最高, 温度系数最稳定的微波介质材料系统。如 Ba-Pb-Nd-Ti 组份的陶瓷, 其介电常数为 90, Q 值为 5000, τ_f 约为 0ppm/°C。BMT-BaSnO₃ 陶瓷, 其介电常数为 25, Q 值为 20000, τ_f 为 0ppm/°C^[23]。

4. 铅基钙钛矿系

该系列在微波频率下具有较高的介电常数和 Q 值, 同时具有近于零的谐振频率温度系数。日本松下公司已经生产出组份为 Pb-Zr-Ca 和 Pb-Ti-Na-Ba 的微波介质陶瓷, 其介电常数大于 110, 在 1~2GHz 下的 Q 为 1200, τ_f 小于 30ppm/°C。陈湘明已公布铅基微波陶瓷组份为 Pb-Sr-Ca-Mg-Nb-Ti-Sn 的专利(专利公告号为 1242347), 其预烧温度为 850~1110°C, 烧结温度为 1200~1350°C。

5. Zr_xSn_zTiO₄ 体系

早在 1941 年 Rath^[24]就报道了 ZrTiO₄ 陶瓷具有良好的介电性能, 1950 年以后, 许多实验室开始研究 ZrO₂-SnO₂-TiO₂ 固溶体陶瓷, 发现该固溶体可以用作低电容率温度系数的电容器^[25]。在八十年代, Zr_xTi_ySn_zO₄ 陶瓷因具有高 Q 值和低的谐振频率温度系数而引起大家的研究兴趣。1981 年 G.Wolfram^[26]等人研究了 Zr_xTi_ySn_zO₄($x+y+z=2$) 陶瓷的结构与微波性能, 指出 Zr_xTi_ySn_zO₄($x+y+z=2$) 陶瓷具有良好的微波性能, 尤其当 $0.15 < z < 0.30$, $1-z/2 < y < 1.05$ 时, Zr_xTi_ySn_zO₄($x+y+z=2$) 陶瓷可以用于制作低损耗、温度稳定的介质谐振器, 谐振

器的温度系数可以通过改变 Sn 含量来调节。1994 年 R.Christoffersen^[27]发现在 ZrO₂-SnO₂-TiO₂ 体系中 (Zr_{0.8}Sn_{0.2})TiO₄ 具有最好的微波性能 ($\epsilon_r=38$, $Q^*f=49000\text{GHz}$ 、 $\tau_f=0\text{ppm}/^\circ\text{C}$)。虽然 ZST 具有良好的微波性能,但在不加添加剂的情况下,用传统的固相法 ZST 陶瓷烧结温度很高^{[28][29]} ($>1400^\circ\text{C}$),为了降低烧结温度,人们添加了各种氧化物如: La₂O₃、ZnO、NiO、Fe₂O₃、Co₂O₃、BaO^{[30][31][32][33][34][35]}等,这些化合物虽然使 ZST 陶瓷的烧结温度降低到 1350℃ 左右,但同时也使 ZST 陶瓷的介电常数有所降低。也有使用化学共沉淀法^[36]合成 ZST 陶瓷,虽然烧结温度有所降低($T_s\approx 1325^\circ\text{C}$),但保温时间较长(8~16 小时)。

1.2.3 微波介质陶瓷的分类

按照微波介质陶瓷的性能和用途可将其分为三类:

1. 低介电常数类 ($\epsilon_r < 30$)

这类微波介质陶瓷材料要求高的品质因子 Q,主要用作微波结构陶瓷,其主要代表是高纯 Al₂O₃ 陶瓷、2MgO-SiO₂ 陶瓷等。

2. 中介电常数类 ($\epsilon_r = 30 \sim 50$)

这类微波介质陶瓷的主要代表是 BaO-TiO₂ 系中的 BaTi₄O₉ 及 Ba₂Ti₉O₂₀ (Zr,Sn)TiO₄ 陶瓷,其特点是工作频率较高, Q 值很高而且谐振频率 f 和温度系数 τ_f 可以系列化。

3. 高介电常数类 ($\epsilon_r > 70$)

这类微波介质陶瓷的特点是工作频率较低,谐振频率温度系数也可以调节到很小,主要用于汽车电话、带通滤波器等器件。其主要代表是稀土改性的 BaO-Ln₂O₃-TiO₂ 系陶瓷。

这三类微波介质陶瓷相应的微波参数如表 1-3

表 1-3 微波介质陶瓷的分类及其代表物质的微波参数

频带 (GHz)	典型材料	特性			
		f (GHz)	ϵ_r	τ_f (/ppm $^{\circ}$ C -1)	Q
0.8~4 低端材料 高介材料 $\epsilon_r \geq 50$	Ba-Sm ₂ O ₃ -5TiO ₂	2	70~90	0 \pm 4	4000
	BaO-Nd ₂ O ₃ -TiO ₂	2	88	0	2000
	Ba(Sr,La)Ti	1.15	80	2	6250
	Pb-Ti-Na-Ba	1	110	<30	1200
4~8 中段材料 30 $\leq \epsilon_r < 50$	BaTi ₄ O ₉	6	39.7	3	7000
	Ba ₂ Ti ₉ O ₂₀	7	37	15	7600
	(Zr,Sn)TiO ₄	7	36	0 \pm 2	6500
	SrTiO ₃ -Sr(Li _{1/4} Nb _{3/4})O ₃	4	36	0	3600
8~18 高端材料 低损耗材料 $\epsilon_r < 30$	Ba(Mg _{1/3} Ta _{2/3})O ₃	10.5	25	10.4	16800
	Ba(Zn _{1/3} Ta _{2/3})O ₃	11.4	30	0.6	14500
	Ba(Mn _{1/3} Ta _{2/3})O ₃	11.4	22	34	5100
	Ba(Zr _{0.04} Zn _{0.32} Ta _{0.96})O ₃	10	30	0	10000

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士学位论文摘要库