

微波介质材料与器件的发展

章锦泰¹, 许赛卿², 周东祥³, 熊兆贤⁴, 方永汉⁵

(1. 成都宏明电子股份有限公司, 四川 成都 610058; 2. 浙江正原电气股份有限公司, 浙江 嘉兴 314003; 3. 华中科技大学, 湖北 武汉 430074; 4. 厦门大学, 福建 厦门 361005; 5. 上海大学, 上海 201800)

摘要: 详细论述了微波介质材料与器件国内外现状和技术发展趋势, 分析了应用前景和国内市场需求, 对我国“十五”发展方向和重点研究课题提出了建议。

关键词: 微波介质材料; 微波陶瓷器件; 介质谐振器; 介质天线; 低温共烧陶瓷

中图分类号: TM28; TN61

文献标识码: A

文章编号: 1001-2028 (2004) 06-0006-04

Development of Microwave Dielectric Materials and Its Applications

ZHANG Jin-tai¹, XU Sai-qing², ZHOU Dong-xiang³, XIONG Zhao-xian⁴, FANG Yong-han⁵

(1. Hongming Electronics Co., Ltd., Chengdu 610058, China; 2. Zhejiang Zhengyuan Electric Co., Ltd, Jiaxing 314003, China;

3. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 4. Xiamen University, Xiamen 361005, China; 5.

Shanghai University, Shanghai 201800, China)

Abstract: Presented are the histories, recent situation and development of microwave dielectric materials and its applications. The communication market, research and production of the microwave dielectric materials and devices in China and the solutions are discussed.

Key words: microwave dielectric material; microwave ceramic devices; dielectric resonator; dielectric antenna; LTCC

微波介质陶瓷是近 30 年来迅速发展起来的新型功能电子陶瓷, 它具有损耗低、频率温度系数小、介电常数高等特点。用这种微波陶瓷材料可以制成介质谐振器 (Dielectric Resonator, 简称 DR)、介质滤波器、双工器、微波介质天线、介质稳频振荡器 (称 DRO)、介质波导传输线等。这些器件广泛应用于移动通信、卫星电视广播通信、雷达、卫星定位导航系统等众多领域。微波介质陶瓷在现代通信、军事技术领域等倍受世人瞩目, 同时也取得了惊人的发展。例如手提电话, 四、五年前还如砖头大小, 而今却小到了火柴盒大小。这种进步不仅只归功于半导体集成电路的发展, 同时很大一部分也归功于微波介质陶瓷所取得的巨大进步。

1 国内外现状

20 世纪 70 年代, Raytheon 首次研制成功 Ba-TiO₂ 系统温度稳定性好、损耗低的微波介质。1971 年日本

NHK kanishi 报告了利用正、负温度系数材料组合成温度稳定的介质谐振器, 1975 年美国贝尔实验室报告进一步改进 Ba-TiO₂ 系统的微波介质材料, 1977 年日本村田研制出 (Zr-Sn) TiO₄ 系统的微波介质陶瓷, 它具有高 Q 值和小频率温度系数, 使微波介质陶瓷走上实用阶段。目前微波陶瓷材料和器件的生产水平以日本 Murata 公司、德国 EPCOS 公司、美国 Trans-Tech 公司、Narda MICROWAVE-WEST 公司、英国 Morgan ElectroCeramics 等公司为最高。其产品的应用范围已在 300 MHz ~ 40 GHz 系列化, 年产值均达十亿美元以上。其中日本 Murata 公司拥有 10 种微波介质陶瓷: $\alpha_r = 36 \sim 40$, 7GHz, $Q > 6000$; $\alpha_r = 37 \sim 40$, 7 GHz, $Q > 7000$; $\alpha_r = 33 \sim 36$, 10 GHz, $Q > 10000$; $\alpha_r = 29 \sim 31$, 10 GHz, $Q > 12000$; $\alpha_r = 27 \sim 29$, 10 GHz, $Q > 15000$; $\alpha_r = 24 \sim 25$, 10 GHz, $Q > 20000$; $\alpha_r = 23 \sim 24$, 10 GHz, $Q > 35000$; $\alpha_r = 6.4 \pm 0.6$, 7 GHz, $Q > 2000$; $\alpha_r = 21.4 \pm 1$, 7 GHz, $Q > 2000$; $\alpha_r = 92 \pm 1$, 1 GHz, $Q > 550$ 。

收稿日期: 2004-02-17 修回日期: 2004-02-26

作者简介: 章锦泰 (1943-), 男, 江苏无锡人, 教授级高级工程师, 研究方向为新型电子元器件和微波技术。Tel: (028)84361969;

E-mail: jintai Zhang@163.com

德国 EPCOS (S+M) 公司拥有 4 种微波介质陶瓷： $\hat{a}_r=21, 7 \text{ GHz}, Q > 7\ 200, \text{MgTiO}_3\text{-CaTiO}_3$ ； $\hat{a}_r=38, 7 \text{ GHz}, Q > 6\ 300, (\text{Zr}, \text{Sn})\text{TiO}_4$ ； $\hat{a}_r=29, 10 \text{ GHz}, Q > 9\ 500, \text{Ba}(\text{Zr}, \text{Zn}, \text{Ta})\text{O}_3$ ； $\hat{a}_r=88, 2.3 \text{ GHz}, Q > 2\ 300, \text{BaO-PbO-Nd}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ 。Ferro 公司拥有 2 种 LTCC 微波介质陶瓷： $\hat{a}_r=37(\text{COG350H}), (\text{ZrSn})\text{TiO}_3$ ； $\hat{a}_r=83(\text{COG820MW}), (\text{Ba}, \text{Nd})\text{TiO}_3$ 。FUJI TITANIUM 拥有 13 种微波介质陶瓷： $\hat{a}_r=8 \sim 98$ 。美国 Trans-Tech 公司拥有 5 种微波介质陶瓷： $\hat{a}_r=29.0 \sim 30.7, 2 \text{ GHz}, Q > 50\ 000$ ； $\hat{a}_r=34.6 \sim 36.7, 2 \text{ GHz}, Q > 35\ 000$ ； $\hat{a}_r=44.7 \sim 46.2, 4.36 \text{ GHz}, Q > 9\ 500$ ； $\hat{a}_r=35.0 \sim 36.5, 4.5 \text{ GHz}, Q > 9\ 500$ ； $\hat{a}_r=27.6 \sim 30.6, 10 \text{ GHz}, Q > 10\ 000$ ；介质谐振器频率覆盖 800 MHz ~ 40 GHz 系列化， $\hat{\delta}_f = (\pm 1 \text{ 或 } \pm 2) \times 10^{-6} \text{ }^{-1}$ 。英国 Morgan Electro Ceramics 公司拥有 6 种微波介质陶瓷，覆盖 600 MHz ~ 25 GHz： $\hat{a}_r=20, 12 \text{ GHz}, Q = 6\ 000$ (Mg-Ca-Ti 系统)； $\hat{a}_r=30, 10 \text{ GHz}, Q = 12\ 600$ (Ba-Zn-Ti 系统)； $\hat{a}_r=37, 9 \text{ GHz}, Q = 5\ 800$ (Zr-Sn-Ti 系统)； $\hat{a}_r=43, 2 \text{ GHz}, Q = 20\ 000$ ； $\hat{a}_r=77, 5 \text{ GHz}, Q = 10\ 000$ ； $\hat{a}_r=88, 5 \text{ GHz}, Q = 1\ 100$ (Ba-Nd-Ti 系统)。

我国也从 1976 年开始研制微波介质陶瓷，首次由上海科技大学方永汉研究成功，1979 年鉴定：A4 陶瓷(BaTi_4O_9)， $\hat{a}_r=40, Q = 4\ 200 \sim 6\ 000$ ，频率温度系数 $\hat{\delta}_f = (-0.73 \sim +5) \times 10^{-6} \text{ }^{-1}$ ；A5 陶瓷($\text{Ba}_2\text{Ti}_9\text{O}_{20}$)， $\hat{a}_r=39, Q = 6\ 200 \sim 8\ 000$ ，频率温度系数 $\hat{\delta}_f = (+2 \sim +15) \times 10^{-6} \text{ }^{-1}$ 。之后国内一些单位如：上海大学、天津大学、上海同济大学、华中科技大学、浙江大学、厦门大学承担了国家“863”计划中相应课题，并取得了一定成果。电子科技大学、清华大学、华南工学院、哈尔滨工业大学、兰州大学、西安交通大学、北京科技大学、电子 13 所、电子 9 所和中科院上海硅酸盐研究所等也对微波介质陶瓷材料及元器件进行了研究。其中上海大学拥有 7 种微波介质陶瓷： $\hat{a}_r=30, 10 \text{ GHz}, Q \cdot f > 100\ 000 \text{ GHz}$ ； $\hat{a}_r=38, 10 \text{ GHz}, Q \cdot f > 60\ 000 \text{ GHz}$ ； $\hat{a}_r=80, 3 \text{ GHz}, Q \cdot f > 8\ 000 \text{ GHz}$ ； $\hat{a}_r=90, 1 \text{ GHz}, Q \cdot f > 5\ 000 \text{ GHz}$ ；新开发 $\hat{a}_r=25, 33$ 和 40 等三种微波介质陶瓷。电子科技大学开发出 $\hat{a}_r=24$ ($\text{BaMg}_{1/3}\text{Ta}_{2/3}\text{O}_3$ 系统， $Q \cdot f > 120\ 000 \text{ GHz}$)、30 (Ba-Zn-Ta 系统) 和 80 (Ba-Nd-Ti 系统) 等三种微波介质陶瓷。厦门大学拥有 6 种微波介质陶瓷： $\hat{a}_r=35 \pm 4, 80 \pm 5, 85 \pm 5, 90 \pm 6, 95 \pm 6, 105 \pm 8$ 。天津大学开发出 $\hat{a}_r=24$ ($\text{BaMg}_{1/3}\text{Ta}_{2/3}\text{O}_3$ 系统) 和 23 (Mg_2TiO_4 系统) 两种微波介质陶瓷，前者 12.44 mm × 5.39 mm, 7.4652 GHz, $Q \cdot f_0 = 172\ 000 \text{ GHz}$ ，频率温度系数 $\hat{\delta}_f = +4.80 \times 10^{-6} \text{ }^{-1}$ ；后者 12.74 mm × 5.88 mm, 7.2297 GHz, $Q \cdot f_0 = 69\ 000 \text{ GHz}$ ，频率温度系数 $\hat{\delta}_f$

$= +13.6 \times 10^{-6} \text{ }^{-1}$ 。

国内微波介质陶瓷材料及器件的生产厂有浙江正原电气股份有限公司、潮州三环(集团)股份有限公司、景华电子有限责任公司(999厂)、苏州捷嘉电子有限公司、浙江嘉康电子有限公司、福建南安讯通电子有限公司等，在技术水平、产品品种和生产规模上与国外相比有较大差距。其中浙江正原电气股份有限公司是目前国内最大的无绳电话双工器和数字移动通信微波介质双工滤波器生产厂，年产量超过 5 000 万只，拥有近 10 种微波介质陶瓷：同轴谐振器用 $\hat{a}_r=20 \pm 1, 37 \pm 1, 90 \pm 1$ 等 3 种，圆柱形或环形谐振器 $\hat{a}_r=8 \sim 90$ 等多种，还有一种 LTCC 微波介质陶瓷， $\hat{a}_r=27, Q \cdot f = 5\ 511 \text{ GHz}$ ，烧成温度 906 °C，3 ~ 6 h。999 厂拥有 4 种微波介质陶瓷： $\hat{a}_r=20 \sim 25, 38, 85$ 和 95 ~ 97。

国内移动通信市场发展速度位居世界第一，据统计，到目前为止，我国移动电话用户数已达到 2.6 亿户，网络容量达到 3 亿多门，在 GSM 蜂窝通信系统中微波基站发射机、接收机以及移动电话均需要大量的微波介质陶瓷滤波器、鉴频器、振荡器、双工器，仅此一项对微波介质陶瓷元件的国内市场需求就达数亿元。

2 发展趋势

微波介质陶瓷器件的发展趋势为微型化、低损耗、高稳定及片式化，生产大规模、低成本等。相应微波介质材料的发展趋势为介电常数和温度系数的系列化(包括 $\hat{a}_r=3 \sim 8$ 的超低介电常数、 $\hat{a}_r=130 \sim 150$ 甚至 200 的超高介电常数，频率温度系数 $2 \times 10^{-6} \text{ }^{-1}$)，超低损耗或超高 Q 值，还要求高密度、高纯和洁净光滑表面，以满足金属化低导体损耗要求。

在微波频率下，微波介质材料的介电常数是不随频率变化的，而 Q 值是随频率升高而下降，因此我们用 $Q \cdot f$ 乘积来表征介质材料的基本性能。

目前国内外已研制成功可适用的微波介质材料列于表 1。

表 1 列出了目前国内外常用的一些微波介质材料系统，可看出，相对介电常数小于 20 和大于 100 以及在 40 ~ 70 之间还缺少频率温度系数好的微波材料，值得进一步研究。特别要指出 LTCC 微波介质材料要加强研究。

目前考虑介质谐振器的基模谐振有 TE_{01a} 、 TM_{01a} 和 TEM 模。 TE_{01a} 模式常用于要求低插损和优异的温度稳定性的卫星通信和卫星广播系统中的微波和毫米波滤波器。而移动通信设备中的滤波器和双工器由于对小型化有较高要求而采用 TEM 模式的介质同轴谐

振器。目前移动通信上用得较多的是 TEM 模滤波器，它可以实现小型化，可以制成贴片式小型滤波器，这

种滤波器的关键工艺是微波陶瓷介质的金属化，金属化既要附着牢，又要导电性能好，其工艺值得深入研究。

表 1 常用的一些微波介质材料
Fig.1 Some common microwave dielectric material

材料系统	相对介电常数 ϵ_r	$\frac{Q \cdot f}{\text{GHz}}$	频率温度系数 δ_f $10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
MgTiO ₃ -CaTiO ₃	21	55 000	-10 ~ +10
Ba(Sn, Mg, Ta)O ₃	25	200 000	-5 ~ +5
Ba(Zn, Ta)O ₃	30	168 000	-5 ~ +5
Ba(Zr, Zn, Ta)O ₃	30	100 000	-5 ~ +5
(Zr, Sn)TiO ₄	38	50 000	-5 ~ +5
Ba ₂ Ti ₃ O ₂₀	40	32 000	+2 ~ +10
BaO-PbO-Nd ₂ O ₃ -TiO ₂	90	5 000	-10 ~ +10
Ba _{6-3x} (Sm _{1-y} Nd _y) _{8+2x} Ti ₁₈ O ₅₄	77	9 000	9
SrO-CaO-Li _{20-x} La ₂ O ₃ -TiO ₂ -(1-x)Sm ₂ O ₃ x = 0.17	117.5	4 122	+14.9
SrO-CaO-Li _{20-x} Nd ₂ O ₃ -TiO ₂ -(1-x)Sm ₂ O ₃ x = 0.17	112.5	4 928	+13.5

LTCC 多层 (multilayer) 滤波器是近几年来快速发展起来技术，它可以更加小型化，目前最小可以做到 2.0 mm×1.2 mm×0.8 mm，用 LTCC 制成双工器可以小型化，用于手机中，它的需要量是很大的。这个市场都给日本、韩国占领，我国必须作为重点课题研究，赶上国际先进水平。

新一代微波介质陶瓷材料的研究开发将主要围绕如下两大方向展开：1) 追求超低损耗的极限；2) 探索更高相对介电常数 (> 100 乃至 > 150) 的新材料体系。前者是为了适应高可靠性与更高频率应用的需要，而后的应用主要是为满足下一代移动电话等的小型化要求。国际上微波介质材料与器件行业一方面为了缩小器件的体积而开发高介电常数的材料体系，另一方面为了提高器件的灵敏度而研究高品质因子的材料配方，重视器件工作的高稳定性而开发小谐振频率温度系数的介质陶瓷；对于微波介质器件 (介质谐振器、滤波器、双工器、GPS 天线、微波电容器等)，不但仍在优化块状产品性能而且还在开发片式器件，以满足移动通信整机体积和重量日益缩小和变轻的发展需求。

3 应用前景

微波介质陶瓷主要用作谐振器、滤波器、介质基片、介质天线、介质波导等，在便携式移动电话、汽车电话、微波基站、无绳电话、电视卫星接收器、无线接入、W-LAN 和军事雷达等方面正发挥着越来越大的作用，应用前景十分广阔。

DRO 就是利用介质谐振器稳定的振荡器，DRO 主要用于卫星接收高频头中作本振用，它可以做得小，而且频率稳定。DRO 也可以作为其它设备的信号源用，它是一种新型微波信号源，具有体积小，重量轻，价格便宜等特点，适合于微波集成电路使用。

用微波介质陶瓷制作微带贴片天线可以实现小型

化，介质天线主要用于全球定位系统 (GPS)，它的特点是尺寸小、窄频带、温度稳定性好。另一方面，用微波介质陶瓷可以在移动电话 (手机) 中作内置天线，也可以用于局域网系统中。利用微波介质谐振器制成天线，然后组成天线阵可以广泛用于其它领域，手机内置天线和无线局域网用天线已研制成功，正在推广应用。

LTCC 技术是近几年来迅速发展起来的，在国内以往 LTCC 局限于制作多层电感、多层电容、LTCC 基板和高密度封装，对应用 LTCC 技术制作多层微波滤波器、天线、双工器等各种微波器件才刚刚起步。

目前我国是移动通信用微波介质元器件的最大市场。在中国，生产移动通信手机的公司有 MOTOROLA、NOKIA、夏新、康佳、TCL 等数十家企业，手机的年产量上亿部；另有厦新电子、中兴通讯等公司生产 2.4 GHz 无绳电话、直放机、中继站等数量可观的相关产品。介质谐振器、滤波器等微波器件是此类整机产品的重要组成部分。目前微波陶瓷市场容量每年可达数亿元人民币。大量依赖进口，既花费大量外汇、又不利于自主技术进步。因此，开展微波介质材料与器件的大规模国产化工作，不仅具有重要的社会效益而且具有显著的经济利益。

预计“十一·五”期间每年我国对谐振器、滤波器、双工器、GPS 天线、微波电容器等微波器件的需求将超过 5 亿只，每只进口价格为 0.2 ~ 8 美元，用汇 1 ~ 4 亿美元。而相应的微波介质陶瓷材料需求总量预计每年约为 1 000 t，每吨售价 2 ~ 5 万美元，用汇 2 000 ~ 5 000 万美元。

从国内外近年的微波通信市场来看，相关的微波器件及其模块产品大多供不应求，部分产品价格不仅没降价而且还在提价，甚至需要现金排队等候购买，体现出产品处于成长初期行业的特点，具有可观的市场需求和经济效益。

4 “十一·五”发展方向和重点研究课题

建议应将在我国建成有国际影响的微波介质谐振器及其器件的产业和如同日本的村田和美国 Trans-tech 一类的大公司, 作为主要目标。

考虑到国内外的现状和发展趋势, 重点研究课题为微波介质陶瓷器件规模化生产的结构设计、加工技术和检测技术, 包括相关生产和检测配套设备的国产化技术。主要研究如何在国际上先进国家已有一定范围知识产权保护垄断的形势下, 开发/优化拥有自主知识产权的微波介质陶瓷器件, 大力开展微波器件设计与加工技术, 应用于微波介质器件的大规模产品生产线上, 尽快促进我国微波介质陶瓷器件高技术产业的形成与发展。

建议重点研究课题:

(1) 微波陶瓷材料

基础研究: 新材料系统相图的研究, 晶体结构和微波介电性能的关系的研究, 化合物形成的机理及动力学研究等。

材料掺杂改性技术研究。

材料制备工艺技术研究。

低烧材料的开发研究。

工程化生产技术研究。

(2) 微波器件

器件结构设计研究。

器件性能优化提高。

多层片式化技术研究。

器件测试技术研究。

(3) 关键技术

材料配方及制备技术。

器件的激励耦合模式与结构设计。

金属电极的影响与选取。

与瓷料共烧的金属电极材料。

低温烧结瓷料与片式化微波元件技术。

可变带宽、可变中心频率的滤波器技术。

同轴型谐振器和制造技术及设备, 多层滤波器的制造技术及设备开发。

测试技术、仪器仪表研究。

5 对国家的建议

(1) 生产基地布点 生产基地布点不宜过多, 选择基础好、优势明显的企业重点支持, 并注意产、学、研相结合, 力争快速走向世界。

(2) 原材料保障 立足国内、定点支持, 采用市场调节; 国家、地方及相关企业共同选点定点方式运行。

(3) 国家科研计划安排 课题分新产品开发、工程化研究、产业化推进三个层次安排; 提倡产、学、研相结合; 强强结合; 产品与市场相结合等三个结合的运行方式, 加快产业化推进速度, 为国家经济建设做出贡献。

参考文献:

- [1] 周东祥. 微波介质材料与器件“十一·五”发展纲要建议[Z]. 华中科技大学.
- [2] 许赛卿. 微波介质材料与器件(专题报告)[Z]. 浙江正原电气股份有限公司、上海科技大学.
- [3] 方永汉. 微波介质材料与器件“十一·五”发展纲要建议[Z]. 上海大学.
- [4] 熊兆贤. 材料物理导论[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [5] 熊兆贤. 移动通信用微波陶瓷(专题)[Z]. 厦门大学.
- [6] 加贺田博司. 21 世纪的微波介质陶瓷[J]. セラミックス, 1998, (1).

(编辑: 傅成君)

(上接第 5 页)

3 结论

用 LB 膜技术制备 BaTiO_3 超微粒-硬脂酸复合 LB 膜, 采用热处理的方法形成 BaTiO_3 超薄膜。紫外-可见光吸收光谱反映 BaTiO_3 超薄膜在近紫外区有一个强烈的吸收峰; 电子自旋共振说明超薄膜中的 BaTiO_3 微粒存在氧空位, 能够成为敏感薄膜。红外光谱和 X 射线衍射反映 BaTiO_3 超微粒的晶体结构发生了变化。

参考文献:

- [1] 孟祥建, 程建功, 杨平雄. 不同退火方式得到的 PbTiO_3 薄膜的红外光谱研究[J]. 物理学报, 2000, 49: 371.

- [2] Miha Drogenik. Initial specific surface area and grain growth in donor-doped barium titanate [J]. J Am Ceram Soc, 1990, 73: 1587.
- [3] Lobe R P S M, Mohallem Nelcy D S, Moreira Roberto L. Grain-size effects on diffuse phase transitions of sol-gel prepared barium titanate ceramic [J]. J Am Ceram Soc, 1995, 78: 1343.
- [4] Kim J H, Hishita S. The effect of substrates on the thin-film structures of BaTiO_3 [J]. J Am Mater Sci, 1995, 30: 4645.
- [5] Tauc J. Optical properties of solid [M]. North-Holland Amsterdam, 1970. 279.
- [6] 刘成林, 李远光, 张兆奎. 铁电超微粒/硬脂酸 LB 膜的制备和光谱特性研究[J]. 物理学报, 1998, 47: 1680.
- [7] Gao M L, Peng X G, Shen J C. Polymer LB film of organic-inorganic composite micogel [J]. Thin Solid Film, 1994, 248: 106.
- [8] Peng X G, Zou B S, Xiao L Z, et al. Formation of nanoparticulate Fe_2O_3 -stearate multilayer through the LB method [J]. J Phys Chem, 1992, 96: 3412.
- [9] 方佑龄, 赵文宽, 邹化明, 等. BaTiO_3 纳米晶的制备和结构 [J]. 高等学校化学学报, 1996, 17: 1685.

(编辑: 傅成君)