

# 微波介质陶瓷产业体系发展研究

苗洋<sup>1,2</sup>, 杨凯<sup>2</sup>, 赵鹏<sup>1</sup>, 杨治华<sup>2,3</sup>, 俞雪勇<sup>2</sup>, 段小明<sup>3</sup>, 贾德昌<sup>2,3\*</sup>, 周玉<sup>3</sup>

(1. 太原理工大学材料科学与工程学院, 太原 030024; 2. 景德镇先进陶瓷研究有限公司, 江西景德镇 333000;  
3. 哈尔滨工业大学特种陶瓷研究所, 哈尔滨 150000)

**摘要:** 微波介质陶瓷作为微波电路中的电介质, 是现代通信技术中的关键基础材料, 广泛应用于通信、导航、雷达、卫星等领域。本文在分析国内外微波介质陶瓷及产业发展现状的基础上, 剖析了当前我国微波介质陶瓷发展面临的问题, 提出了涵盖发展目标、发展思路、重点发展方向以及发展路线图的微波介质陶瓷产业体系自立自强发展战略。为促进微波介质陶瓷的发展, 实现我国微波介质陶瓷产品由中低端为主向高端型升级转变, 突破高性能微波介质陶瓷制备技术及上游高纯原材料的自主化生产技术, 建议加强微波介质陶瓷的基础研究和应用研究、强化重点微波通信领域的创新研发、积极布局第六代移动通信用介质陶瓷和加强产业生态建设。

**关键词:** 电介质; 微波介质陶瓷; 微波元件; 新型材料

**中图分类号:** TQ174 **文献标识码:** A

## Development of Industry System of Microwave Dielectric Ceramics

Miao Yang<sup>1,2</sup>, Yang Kai<sup>2</sup>, Zhao Peng<sup>1</sup>, Yang Zhihua<sup>2,3</sup>, Yu Xueyong<sup>2</sup>, Duan Xiaoming<sup>3</sup>,  
Jia Dechang<sup>2,3\*</sup>, Zhou Yu<sup>3</sup>

(1. College of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;  
2. Jingdezhen Advanced Ceramics Research Co., Ltd., Jingdezhen 333000, Jiangxi, China; 3. Institute for  
Advanced Ceramics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150000, China)

**Abstract:** Microwave dielectric ceramics, owing to their ability to serve as dielectrics in microwave circuits, are widely used in communications, navigation, radar, satellite, and other fields as a key foundational material in modern communications technology. Grounded in an analysis of the current state of microwave dielectric ceramics and their corresponding industry both in China and abroad, this study identifies the challenges faced in the development of these ceramics in China and proposes a strategy for the independent development of microwave dielectric ceramics, encompassing development goals, strategies, key directions, and a development roadmap. The study aims to promote the development of microwave dielectric ceramics, facilitate the shift of the product structure from mid- to high-end products, and achieve breakthroughs in high-performance microwave dielectric ceramics preparation techniques and the independent production of upstream high-purity raw materials. Recommendations for research include strengthening the basic research and application foundations of microwave dielectric ceramics, enhancing innovative research and development in key areas of microwave communications, actively planning for 6G dielectric ceramics, and strengthening the development of the industry's ecosystem.

**Keywords:** dielectric; microwave dielectric ceramics; microwave components; new materials

收稿日期: 2024-04-16; 修回日期: 2024-05-28

通讯作者: \*贾德昌, 哈尔滨工业大学特种陶瓷研究所教授, 研究方向为特种陶瓷材料; E-mail: dcjia@hit.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“关键材料体系自立自强战略研究”(2022-PP-02)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

## 一、前言

微波介质陶瓷作为一种特定的功能陶瓷,能够在微波电路中充当电介质使用,是现代通信中的关键战略材料,广泛应用于通信、导航、雷达、卫星等领域。物联网、第五代移动通信/第六代移动通信(5G/6G)等技术的快速发展,对具有宽范围介电常数、低微波损耗、温度系数小等优良性能,适用于制作各种微波器件,能满足微波电路小型化、集成化、高可靠性和低成本要求的微波介电陶瓷需求在不断增加<sup>[1-6]</sup>。

我国微波介质陶瓷产业起步较晚,在技术研发和市场竞争方面与国外先进水平还存在一定差距。近年来,国家积极注重微波介质陶瓷及产业的发展,先后发布了一系列推动研究开发和产业化发展的政策规划。《电子信息产业调整和振兴计划》(2009年)明确将微波介质陶瓷列为关键战略材料,标志着我国微波介质陶瓷进入优化发展阶段。《“十三五”材料领域科技创新专项规划》(2017年)、《中国电子元器件行业“十四五”发展规划》(2021年)等相关文件强调,不断加强对微波介质陶瓷的供给侧改革和突破引导,力争促进我国微波介质陶瓷产业发生结构性变化,建立全球领先的技术创新和产业体系。

经过多年发展,我国的微波介质陶瓷产量占到全球总产量的40%以上,然而,微波介质陶瓷的产值仅占全球总产值的1/4。高性能微波介质陶瓷存在对外依赖度高、基础研究薄弱和产业链不完善等问题,限制了我国高端通信行业的发展<sup>[7]</sup>。本文从战略角度出发,深入分析国内外微波介质陶瓷的发展现状和趋势,剖析我国相关领域存在的问题,并提出发展战略和对策建议,为推动微波通信领域产业创新发展,实现我国加入创新型国家行列的战略目标提供关键材料支撑。

## 二、国外微波介质陶瓷及产业体系发展概况

### (一) 国外微波介质陶瓷的研发现状

1939年,美国学者Richtmeyer<sup>[8]</sup>首次提出了介质谐振器概念,成为微波介质陶瓷探索的开端,此后美国率先开展微波介质特性研究,并在20世纪70年代成功研制出了介电常数( $\epsilon$ )为38的BaTi<sub>4</sub>O<sub>9</sub>材料<sup>[9]</sup>。日本几乎与美国同时开展此项工作,

于20世纪70年代研制出了性能优异的Ba<sub>2</sub>Ti<sub>9</sub>O<sub>20</sub>陶瓷材料,在20世纪80年代继续跟踪研发了Ba(Mg<sub>1/3</sub>Ta<sub>2/3</sub>)O<sub>3</sub>、Ba(Zn<sub>1/3</sub>Ta<sub>2/3</sub>)O<sub>3</sub>、BaO-Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub>(BMT、BZT、BST)等陶瓷材料并开始商业化应用,同时期日本村田制作所、松下电器产业株式会社、碍子株式会社等介质陶瓷生产企业逐渐占据全球市场份额。随后,欧洲的各个国家相继开展了针对微波介质陶瓷的科研进程<sup>[10-12]</sup>。目前,全球微波介质陶瓷市场已进入成熟发展阶段,日本、美国、欧洲、中国等国家和地区是研究与制造微波介质陶瓷的主要参与者。其中,日本的微波介质陶瓷企业技术积累丰富,产品覆盖全面,占据了我国高性能微波介质陶瓷产品约90%以上的市场份额。

微波介质陶瓷作为无线通信的基础材料,在5G技术中发挥着不可替代的作用。目前,用于移动通信的相对介电常数( $\epsilon_r$ ) $\geq 60$ 的介质陶瓷,毫米波、亚毫米波回路集成化的介质波导线路的 $\epsilon_r \leq 30$ 的介质陶瓷,是全球微波介质陶瓷的研究热点和难点<sup>[13]</sup>。随着5G商用化的逐渐扩大,针对6G不同技术路线的关键材料研发布局已经着手开展,迫切需要能够覆盖通信领域各个特殊频段使用要求的微波介质陶瓷。

目前,全球已研制出多种不同体系的微波介质陶瓷,因不同体系的 $\epsilon_r$ 和表现差异明显,学者普遍根据介电常数不同将其大致划分为低、中、高介电陶瓷3种类型。表1列出了不同微波介质陶瓷的分类和应用情况。微波介质陶瓷的性能评价指标除 $\epsilon_r$ 外,还包括品质因数( $Q \times f$ )和谐振频率温度系数( $\tau_f$ )。其中, $Q \times f$ 表征材料在外电场作用下激发激化过程的损耗,值越大,表示材料介电损耗越小、性能越高; $\tau_f$ 用来衡量微波介质材料和器件的温度稳定性,值越接近0,表示该材料的热稳定性越好<sup>[14-17]</sup>。

### (二) 国外微波介质材料产业体系的发展现状

从全球范围来看,美国、日本、俄罗斯等国家依靠先发优势,从20世纪中期开始发展以来,已形成完善的产业布局和各具特色的材料体系。

#### 1. 微波介质陶瓷粉体产业

常见的微波介质陶瓷粉体是采用固相烧结法,由多种氧化物粉料混合、煅烧再机械研磨制成的,粉体的粒度、纯度和形貌等直接影响微波介质陶瓷的介电性能、品质因数等多项参数,因此,在微波

表1 不同微波介质陶瓷应用情况

分类	体系	应用场景
低介电陶瓷 ( $\epsilon_r < 20$ )	$\text{Al}_2\text{O}_3$ 体系、 $\text{MgTiO}_3$ 、矾、锗磷酸盐体系、 $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ 、 $\text{MgSiO}_4$ 等	微波基板、微波传输带、高端微波元件、片式介质天线、阻带滤波器、全球定位系统、毫米波雷达、蓝牙、无线局域网、超稳定振荡器等
中介电陶瓷 ( $20 \leq \epsilon_r < 70$ )	$\text{BaO-TiO}_2$ 体系、 $\text{Ln}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ 体系、钙基或钡基复合钙钛矿、 $(\text{Zr, Sr})\text{TO}_4$ 、 $\text{MO-Mn}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ 体系等	4~8 GHz 频率范围的卫星通信、移动通信基站、电容器、微波介质谐振器、片式多层陶瓷电容器 (MLCC) 以及高频、高速、超低功耗滤波器件等
高介电陶瓷 ( $\epsilon_r \geq 70$ )	$\text{BaO-Ln}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{CaTiO}_3$ 、 $\text{SrTiO}_3$ 、 $(\text{Li}_{1/2}\text{Ln}_{1/2})\text{TO}_3$ 、 $\text{CaO-Li}_2\text{O-Ln}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ 等	0~4 GHz 低频移动电话中的微波谐振器/滤波器/谐振器、微波移相器、微波电容器、高储能介电陶瓷、动态随机存储器、热释电红外探测器等

介质陶瓷制造过程中通常使用综合指标表现优异的高纯原料。

陶瓷粉体材料约占微波介质陶瓷类产品成本的30%，因此微波介质陶瓷粉体的价格直接影响中游企业的盈利水平。国外陶瓷粉体供应商主要来自欧洲、美国、日本等国家和地区，如日本德山株式会社、住友化学株式会社、村田制作所、京瓷株式会社，美国福禄集团等的粉体生产领军企业，并占据了全球陶瓷粉体的高端市场。例如，在 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 陶瓷产品方面，晶粒细小、结构均匀的 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 粉末由日本企业把控；在高性能多层陶瓷电容器用陶瓷粉体方面，日本的相关企业可以根据订单要求，在100 nm的钛酸钡基础上进行改性，最终可制成小尺寸的陶瓷粉体。

## 2. 微波介质陶瓷产业

国外微波介质陶瓷产业体系的发展经历了最初的K38、 $\text{Ba}_2\text{Ti}_9\text{O}_{20}$ 陶瓷的研发，到钙钛矿结构陶瓷的改性和优化，再到复合新材料和多结构的探索。在微波介质陶瓷的早期发展阶段，美国、日本、欧洲等国家和地区之间曾存在激烈的竞争，后来日本逐渐占据了明显的优势地位<sup>[18]</sup>。根据最近的发展趋势，美国以发展高介电常数、非线性微波介质陶瓷和新型6G用介质陶瓷技术为重点；欧洲则受限于后续研发投入，主要研究用于固定频率谐振器所需的材料；日本依靠其丰富的产业化和市场应用优势，掌握着标准定制和高品质产品的主导权<sup>[19]</sup>。目前，日本的村田制作所、京瓷株式会社、TDK株式会社以及美国Trans-Tech公司等微波介质生产水平方面处于领先地位。

## 3. 微波介质陶瓷器件产业

21世纪初，微波介质陶瓷开始应用于滤波器。

射频器件市场主要由日本京瓷株式会社、Trans-Tech公司、康普通讯技术有限公司等企业主导。国外的微波介质陶瓷器件主要由日本京瓷株式会社、村田制作所、TDK株式会社、村田制作所，美国Trans-Tec公司、罗杰斯科技有限公司，德国赛琅泰克集团等企业生产，相关产品主要分为两大类：一类是用于介质谐振器的滤波器、分频器、双工器、多工器、调制解调器等器件，另一类是用于微波电路中的介质波导、微波天线、微波集成电路的基片、微波电容器等器件。微波介质陶瓷器件产品的应用范围可实现300 MHz~40 GHz的全系列规模化生产，具有产量大、应用领域广、综合性能优异等特点。

## 三、我国微波介质陶瓷的发展现状与存在的问题

### (一) 我国微波介质陶瓷的研发现状

20世纪80年代，我国着手开展微波介质陶瓷研究，以跟踪国外关于 $\text{BaO-TiO}_2$ 系微波介质陶瓷的研究成果为主。20世纪90年代，华南理工大学、上海科技大学等开始进行 $\text{Ba}(\text{Zn}_{1/3}, \text{Ta}_{2/3})\text{O}_3$ 、 $\text{BaO-Sm}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ 、 $\text{BaO-La}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ 等其他体系的研究工作，并逐渐加强自主研发能力。但由于介电常数测试条件不够充分，介电损耗测试数据精确性有待提高，导致相关产品无法满足国内微波通信技术发展的需求。自20世纪90年代开始，我国发布了多项政策和规划，推动微波介质陶瓷的研发，并将其列为重要研究课题。

经过多年发展，我国在微波介质陶瓷领域已经取得了显著的进展。①在技术更新方面，我国在微



波介质陶瓷的制备、性能优化、应用等方面取得了显著进展，特别是在系列化介电常数、高品质因数和温度稳定性等微波介质陶瓷性能指标上取得了突破。②在自主研发方面，我国高校和科研院所如中国科学院上海硅酸盐研究所、清华大学、西安交通大学、电子科技大学、华中科技大学等积极开展微波介质陶瓷的研究，开发出一系列具有自主知识产权的材料和器件并取得多项研究成果<sup>[20,21]</sup>，使得包括 BZT-BMT 等多系列材料达到较高性能水平；同时，在全球范围内首创先进热等静压（HIP）工艺制备的 BaO-Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> 微波陶瓷已进入应用筹备。③在产业化应用方面，我国已经实现了微波介质陶瓷的产业化生产，并在 5G、卫星导航等领域实现了规模化应用。④在国际合作方面，我国加强与国外先进国家和机构的合作，通过引进技术、合作研发等方式提升自身技术水平和国际市场影响力。

## （二）我国微波介质陶瓷产业体系的发展现状

我国微波介质陶瓷产业经过多年的快速发展，已进入优化升级的发展阶段。国内微波介质陶瓷在电子、光纤通信、国防军工等行业的需求旺盛，市场规模不断扩大，从 2014 年的 16.18 亿元上涨至 2022 年的近 70.53 亿元，年复合增长率为 20.21%，实现了快速增长；2023 年我国微波介质陶瓷产业产值约为 80.09 亿元。这一阶段的快速增长得益于微波介质陶瓷应用范围不断扩展、下游需求旺盛以及国家利好政策支持。

### 1. 微波介质陶瓷粉体产业

近年来，我国陶瓷粉体的研发取得了较大进步，产业规模不断扩大，产品种类不断丰富、技术水平在相关政策和市场支持下不断提高。山东国瓷功能材料股份有限公司依托多项科研平台，开发出系列具有高稳定性、高  $Q \times f$  值的微波介质陶瓷粉体材料并可实现规模化量产。无锡惠虹电子有限公司通过与华为技术有限公司进行战略合作，已开发出 9 类不同的微波介质陶瓷粉体材料，其粉料研发基地已具备年产各类微波介质陶瓷粉末 150 t 的能力，并通过了相关的产品合格验证；无锡鑫圣慧龙纳米陶瓷技术有限公司生产的微波介质陶瓷粉体可覆盖相对介电常数为 6~150 的全系列规格产品。但国产微波介质陶瓷粉体与日本特种粉体相比仍有差距，亟待加快粉体制造研究。此外，我国上游陶瓷粉体生产

企业数量少，可以覆盖高端陶瓷粉体生产的企业更少，因此上游陶瓷粉体生产企业整体议价能力较强。

### 2. 微波介质陶瓷产业

自华为技术有限公司在 5G 基站使用介质波导滤波器方案以来，我国微波介质陶瓷产业进入快速发展阶段，新型高性能微波介质陶瓷材料不断涌现，如高介电常数、低损耗、宽温域稳定等特性材料，满足了通信、雷达、卫星导航等领域的高性能微波器件需求。企业生产工艺优化，如流延、注射成型等制备技术的扩大应用，提高了产品的一致性与生产效率。在多方参与下，目前市场竞争格局以多元化、中小型企业为主，竞争格局较为复杂；由于下游市场变化较大，能快速响应器件应用需求的企业研发成本竞争加剧。近年来，发展规模较大的介质陶瓷生产企业有广东风华高新科技股份有限公司、武汉凡谷电子技术股份有限公司、嘉兴佳利电子有限公司、江苏灿勤科技股份有限公司、广东国华新材料科技股份有限公司等，但在技术积累、产品多样性以及产业化规模等方面与国际知名企业相比仍存在较大差距。我国 5G 的快速发展，对高频高性能微波器件提出了更高的要求，同时无线互联网、无线传感网、物联网、卫星通信、车载定位系统等技术的发展，为微波介质陶瓷产业的发展提供了广阔的市场空间。

### 3. 微波介质陶瓷器件产业

21 世纪初，我国可以独立生产滤波器和谐振器的企业还处于早期发展阶段，随着市场的发展和国家相关政策的推动，逐渐可以生产进口产品的替代乃至赶超品。2012 年，大富科技股份有限公司通过整合资源，成功收购了美国康普通讯技术有限公司的子公司弗雷通信技术有限公司以及波尔威技术有限公司的子公司苏州飞创（电讯）产品有限公司，拓展了移动通信射频器件、结构件的产品种类和生产能力，实现产业链优化。同时，江苏灿勤科技股份有限公司自主研发的 900 MHz 高  $Q \times f$  值横磁模介质谐振器，以其优越的电性能和短交货期，打破了日本京瓷株式会社和美国 Trans-Tech 公司在介质谐振器市场的垄断地位。至此，国内射频器件产业步入以国内企业为主导的发展新阶段。

5G 的快速发展对小型化、多功能和低成本滤波器的要求进一步提高，介质波导滤波器技术已成为 5G 领域的成熟解决方案之一<sup>[19-24]</sup>。传统的金属腔

体滤波器生产商也纷纷积极转型，在此过程中，如江苏灿勤科技股份有限公司和苏州艾福电子通讯股份有限公司等微波介质陶瓷元器件生产商迎来了快速发展的新机遇。此外，深圳顺络电子股份有限公司、广东通宇通讯股份有限公司、深圳国人通信股份有限公司等已成为滤波器领域的主要竞争者。在基站用介质波导滤波器领域，我国企业已经具有国际比较优势。

### （三）我国微波介质陶瓷发展存在的问题

#### 1. 高端产品依赖进口

尽管我国在某些基础微波介质陶瓷的生产和应用上已经取得了一定成就，但在高端产品方面仍然依赖进口。用于高频及超高频应用的高端微波介质陶瓷和组件，如低损耗、高 $Q \times f$ 值产品，仍主要依赖国外供应。我国尚未完全掌握部分微波介质陶瓷的核心技术，高端应用领域的产品性能和可靠性与国际先进水平相比存在差距。此外，我国约90%的高端微波介质陶瓷市场份额由国外企业占据，国内企业仅拥有不到10%的市场份额。当前，我国微波介质陶瓷企业对高端类微波介质陶瓷的进口依赖度偏高，在一定程度上制约了我国微波介质陶瓷的发展。我国正处于5G建设关键期和6G发展开幕期，为了贯彻落实“十四五”规划纲要的要求，亟需把握未来3~5年的关键时期，开发拥有我国自主知识产权的高性能新型微波介质陶瓷，实现微波介质陶瓷的突破发展。同时，需要进一步提升我国在全球微波介质陶瓷领域的自主创新能力，以市场需求为导向，掌握核心技术，增强微波介质陶瓷产业优势，实现高水平科技自立自强。

#### 2. 基础研究薄弱

微波介质陶瓷研究涉及的学科领域复杂、技术壁垒高，如微波介质陶瓷元器件生产涵盖材料学、微波与电磁场、电子技术与应用、微波与射频测量、高精度机械制造、电磁兼容与可靠性等多种理论与技术，需要长期的技术积累。我国微波介质陶瓷的基础理论研究相对薄弱，缺乏对材料微观结构与宏观性能关系的系统性研究，并且在这些交叉学科领域，高端人才的数量和质量均需提升。在新材料、新工艺和新方法方面，我国的原创性突破较少，多数研究仍处于跟踪和模仿阶段。同时，生产工艺和设备会直接影响产品质量和生产效率，在微

波介质陶瓷制备过程中，我国烧结工艺、成型工艺等的技术水平有待提高，生产设备的自动化程度和精度较低，影响了产品的一致性和批量生产的效率。

#### 3. 产业链不完善

微波介质陶瓷的主要应用方向为通信行业，而通信产品种类多样，市场需求更新频繁，不同频段类型产品需要高弹性的定制化生产，从而推动微波介质陶瓷生产企业具备较高的研发实力和新产品快速响应能力。微波介质陶瓷产业的生产技术壁垒高，导致生产企业数量少、整体产能供给弱，在一定程度上制约了行业的规模化发展。尽管微波介质陶瓷有着稳定的市场规模和发展前景，但我国的整体产能小、相关企业在技术水平和产品品种方面与日本村田制作所、TDK株式会社等国际领军企业依然存在显著差距，导致供给能力较弱，难以满足下游市场的庞大需求。产业链各环节间的协同创新能力不强，特别是在高端应用领域，材料生产与需求之间存在脱节，导致供需不匹配；从原材料制备到最终产品应用各环节的配套产业尚不健全，影响了产业链的整体效率和竞争力。标准化是确保产品质量和市场竞争力的重要手段，而我国现有的微波介质陶瓷技术标准和检测规范不够完善，缺乏针对不同应用领域和性能要求的系统性标准。在国际标准制定中，我国的话语权较弱，导致国内产品在国际市场上面临技术壁垒和认证困难。

## 四、我国微波介质陶瓷体系自立自强发展战略

为确保我国在6G领域可以继续保持领先地位，实现产业链的自主可控，需要把握目前微波介质陶瓷发展的窗口期，以国家战略需求为导向，瞄准微波介质陶瓷关键材料科技前沿，加强基础研究，强化应用研究，注重成果转化，培育新兴产业，打造具有国际影响力的微波介质陶瓷关键材料创新高地。

### （一）发展目标

我国微波介质陶瓷产业应以实现微波介质陶瓷产品结构由中低端产品向高端型调整、突破高性能微波类陶瓷制备技术及上游原材料的自主化生产技术为发展导向，以产业结构不断升级、系统行业优质发展为目标，推动我国从微波介质陶瓷大国向微



波介质陶瓷强国迈进，为推动我国成为创新型国家提供关键材料支撑。同时，注重国际合作和交流，积极融入国际市场，与国外高校、研究机构和企业展开技术合作交流，提升微波介质陶瓷产品的竞争力和市场占有率。

## （二）发展思路

加强基础理论研究，着力研究科技前沿并解决市场应用难题，获得一系列原创微波介质陶瓷新材料和新应用成果。① 通过掺杂改性、结构优化或微粉调控等方式弥补性能不足，降低体系谐振频率温度系数，追求更高频率下的超低损耗，提升体系品质因数，同时探索更高介电常数的新材料体系，平衡介电常数、品质因数和谐振频率温度系数三者之间的关系。② 突破限制材料应用的基础性问题。目前，我国通过克莫方程、晶格动力学、太赫兹时域光谱与第一性原理相结合，开展了微波介质陶瓷的内在机理研究，利用 P-V-L 理论和红外反射光谱解释了介电性能机制，但相关实验仍受气孔、显微组织、二次相等外部因素影响无法准确预判某具体材料的介电性能表现。③ 使用高纯原料、改进制备工艺、研发新型制造装备等来提高材料介电性能。例如，微波介电陶瓷粉体企业需加大研发投入，提供超细、高纯、高一一致的原料；利用等离子球磨、等静压成型、热压/微波烧结以及低温共烧陶瓷（LTCC）、高温共烧陶瓷（HTCC）等工艺进行产线创新。

为配合国家相关战略的发展推进，微波介质陶瓷产业将以卫星通信、智慧城市、海洋与星际开发、大数据社会和物联网等领域的需求为导向，持续开展技术创新，提升产品性能和质量，以推动更高频率、低损耗的微波介质陶瓷研发，重点推进微波介质陶瓷的工程化和产业化关键技术研究；重点突破包括高频介质陶瓷、毫米波电介质材料、集成回路低温介质材料在内的核心制备技术以及智能制造、特殊检测设备和应用技术；促进跨产业链的协作创新，推动先进成果普及，保障关键材料能适应新兴通信、航天、国防、物联网等领域的发展需要，实现高端微波介质陶瓷的自主供应。

## （三）重点发展方向

随着移动通信和卫星通信的迅速发展，尤其是微波器件多层设计思想的提出，微波器件的小型

化、高频化和多频化进程加速，微波介质陶瓷的低温烧结、低损耗和可调介电常数，以及微波器件的进一步实用化，势必成为新一轮研究的焦点。

当前，微波介质陶瓷领域的重点发展方向包括 5 个方面。① 提高微波介质陶瓷的介电性能，通过材料配方优化、制备工艺改进、晶粒细化处理、界面修饰、多材料复合等多种方法，综合调控相对介电常数，提高材料品质因数，调控谐振频率温度系数，精准设计未来市场需求的微波器件。② 降低微波介质陶瓷的烧结温度（ $<650\text{ }^{\circ}\text{C}$ ），以满足低温陶瓷共烧技术的需求。现有 LTCC 技术可实现与低熔点电极的  $850\sim 1050\text{ }^{\circ}\text{C}$  低温烧结，但在其过程中仍会与某些基板成分发生化学反应。为实现复杂多层布线 and 三维封装结构，仍需进一步控制烧结温度并提高材料性能，可通过添加新型助溶剂等优化生产工艺，扩大应用范围，加强全球化视角下的技术交流与合作。③ 通过开发新材料，减少昂贵原料使用，加大产业资源、质量及供应链管理投入，进而获得性能更为优异的微波介质陶瓷，并降低生产成本；采用更高效的制备工艺，如共沉淀、微波烧结等，实现更均匀的微观结构，降低孔隙率，减少能源消耗和设备投入。④ 探索新的微波介质陶瓷体系，根据元素周期表中各元素的本征特性关系，研究具有良好介电性能的新型微波介质陶瓷新体系，以满足 5G、6G 技术的发展需求。例如，探讨高介电常数微波介质新体系，探究微波介质陶瓷低损耗的极限和超低损耗，探索频率可调微波介质陶瓷研发技术等。⑤ 进一步开展材料机理研究，深入研究微波介质陶瓷的极化机理与损耗之间的关系，为设计和制造高性能、低成本的微波介质陶瓷提供理论指导与实践途径。集中探讨其电磁性能、制备工艺、微观结构以及应用等方面，探究缺陷、界面极化、电导损耗、离子迁移等与介电性能的关联，分析材料晶相结构、气孔、点线缺陷等对微波介电性能的影响。

## （四）发展路线图

根据目前微波介质陶瓷的发展现状，本研究提出了微波介质陶瓷面向 2050 年的发展路线图（见图 1）。在技术体系建设方面，通过加强材料基础研究、重点攻关前沿技术、突破关键共性技术等，推动微波介质陶瓷创新和应用推广。在产业体系建设方面，通过构建一体化、全方位和多类型的产品覆



图1 微波介质陶瓷发展路线图

盖产业链，实现5G/6G乃至更高新通信领域用介质陶瓷材料占据主导地位，建立全球领先的产业体系。在支撑体系建设方面，通过完善上下游产业链、加强行业关键人才培养和知识产权布局与保护等，为微波介质陶瓷技术与产业的发展提供全面的支持，促进产业稳定发展和技术创新。

## 五、对策建议

### （一）加强基础研究与应用研究

加强微波介质陶瓷关键材料的结构与性能关系、制备工艺与制造技术、环境稳定性与可靠性等基础研究。开展材料应用的原理性基础研究，探索低温烧结助溶剂添加机理，形成完整的应用基础理论体系。瞄准行业关键技术难题，组织精锐力量进行集中攻关，开展前瞻性技术研究和关键工艺研究，提高材料的成熟度和稳定性。

### （二）强化重点微波通信领域的创新研发

在移动通信5G配套材料、适用6G新型电子元件制造技术的新型材料、高介电性能LTCC、中低介电常数陶瓷、高 $Q \times f$ 值和温度稳定的介电陶瓷等

关键产品和领域，开展重点创新研发。加大技术研发力度，实现一批重大科技成果转化，提升产业核心竞争力，开展产业共性技术研究，促进科技成果的转化和推广应用。

### （三）积极布局6G用介质陶瓷

把握发展窗口期，加强微波介质陶瓷在6G重点建设方向的应用匹配研究，积极布局太赫兹波应用的低损耗介质陶瓷体系建设。针对6G高频通信的特点，发展准确、可靠、稳定的太赫兹波介电性能测试方法，开发相应的微波介质陶瓷元器件，并优化设计以提高整体系统性能。积极引导和推动高校、科研院所和企业提前做好技术储备，灵活调整研发方向和生产计划，以适应市场的变化。

### （四）加强微波介质陶瓷产业布局

推动产业集聚发展，建设具有国际影响力的微波介质陶瓷关键材料产业基地。加强产业链上下游合作，促进资源共享和信息交流，推动产业协同发展。统筹规划介质陶瓷材料产业链上下游企业布局，完善相关标准建设，加强知识产权保护，促进创新成果的转化和应用。

## 利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

**Received date:** April 16, 2024; **Revised date:** May 28, 2024

**Corresponding author:** Jia Dechang is a professor from the Institute for Advanced Ceramics, Harbin Institute of Technology. His major research field is advanced ceramic materials. E-mail: dcjia@hit.edu.cn

**Funding project:** Chinese Academy of Engineering project “Strategic Research on the Self-Reliance and Self-Improvement of Critical Materials System” (2022-PP-02)

## 参考文献

- [1] Yang H C, Zhang S R, Yang H Y, et al. The latest process and challenges of microwave dielectric ceramics based on pseudo phase diagrams [J]. *Journal of Advanced Ceramics*, 2021, 10(5): 885–932.
- [2] Guo H H, Zhou D, Du C, et al. Temperature stable  $\text{Li}_2\text{Ti}_{0.75}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})_{0.25}\text{O}_3$ -based microwave dielectric ceramics with low sintering temperature and ultra-low dielectric loss for dielectric resonator antenna applications [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2020, 8(14): 4690–4700.
- [3] Guo W J, Ma Z Y, Luo Y, et al. Structure, defects, and microwave dielectric properties of Al-doped and Al/Nd Co-doped  $\text{Ba}_4\text{Nd}_{9.33}\text{Ti}_{18}\text{O}_{54}$  ceramics [J]. *Journal of Advanced Ceramics*, 2022, 11(4): 629–640.
- [4] Liu L T, Guo W J, Yan S J, et al. Microstructure, Raman spectroscopy, THz time domain spectrum and microwave dielectric properties of  $\text{Li}_2\text{Ti}_{1-x}(\text{Zn}_{1/3}\text{Ta}_{2/3})_x\text{O}_3$  ceramics [J]. *Ceramics International*, 2023, 49(4): 6864–6872.
- [5] Yang H Y, Chai L, Liang G C, et al. Structure, far-infrared spectroscopy, microwave dielectric properties, and improved low-temperature sintering characteristics of tri-rutile  $\text{Mg}_{0.5}\text{Ti}_{0.5}\text{TaO}_4$  ceramics [J]. *Journal of Advanced Ceramics*, 2023, 12(2): 296–308.
- [6] Hsiang H I, Chen C C, Yang S Y. Microwave dielectric properties of  $\text{Ca}_{0.7}\text{Nd}_{0.2}\text{TiO}_3$  ceramic-filled  $\text{CaO-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  glass for LTCC applications [J]. *Journal of Advanced Ceramics*, 2019, 8(3): 345–351.
- [7] 王本力, 王兴艳. 全球电子陶瓷产业发展概况 [J]. *新材料产业*, 2016 (1): 9–12.  
Wang B L, Wang X Y. General situation of global electronic ceramic industry development [J]. *Advanced Materials Industry*, 2016 (1): 9–12.
- [8] Richtmyer R D. Dielectric resonators [J]. *Journal of Applied Physics*, 1939, 10(6): 391–398.
- [9] Masse D J, Pucel R A, Readey D W, et al. A new low-loss high-k temperature-compensated dielectric for microwave applications [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1971, 59(11): 1628–1629.
- [10] Reaney I M, Iddles D. Microwave dielectric ceramics for resonators and filters in mobile phone networks [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2006, 89(7): 2063–2072.
- [11] Narang S B, Bahel S. Low loss dielectric ceramics for microwave applications: A review [J]. *Journal of Ceramic Processing Research*, 2010, 11(3): 316–321.
- [12] Ohsato H. Research and development of microwave dielectric ceramics for wireless communications [J]. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 2005, 113(1323): 703–711.
- [13] 马调调. 微波介质陶瓷材料应用现状及其研究方向 [J]. *陶瓷*, 2019 (4): 13–23.  
Ma D D. Application status and research direction of microwave dielectric ceramics [J]. *Ceramics*, 2019 (4): 13–23.
- [14] Zhang J J, Zhai J W, Chou X J, et al. Microwave and infrared dielectric response of tunable  $\text{Ba}_{1-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_3$  ceramics [J]. *Acta Materialia*, 2009, 57(15): 4491–4499.
- [15] Song X Q, Du K, Li J, et al. Low-fired fluoride microwave dielectric ceramics with low dielectric loss [J]. *Ceramics International*, 2019, 45(1): 279–286.
- [16] Chen X M, Sun Y H, Zheng X H. High permittivity and low loss dielectric ceramics in the  $\text{BaO-La}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-Ta}_2\text{O}_5$  system [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2003, 23(10): 1571–1575.
- [17] Yue T, Li L X, Du M K, et al. Multilayer co-fired microwave dielectric ceramics in  $\text{MgTiO}_3\text{-Li}_2\text{TiO}_3$  system with linear temperature coefficient of resonant frequency [J]. *Scripta Materialia*, 2021, 205: 114185.
- [18] 曲秀荣, 贾德昌. 微波介质陶瓷的研究进展 [J]. *硅酸盐通报*, 2006, 25(6): 144–147.  
Qu X R, Jia D C. The recent progress of microwave dielectric ceramics [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2006, 25(6): 144–147.
- [19] Lou W C, Mao M M, Song K X, et al. Low permittivity cordierite-based microwave dielectric ceramics for 5G/6G telecommunications [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2022, 42(6): 2820–2826.
- [20] Zhang L, Pu Y P, Chen M. Ultra-high energy storage performance under low electric fields in  $\text{Na}_{0.5}\text{Bi}_{0.5}\text{TiO}_3$  based relaxor ferroelectrics for pulse capacitor applications [J]. *Ceramics International*, 2020, 46(1): 98–105.
- [21] Li R T, Xu D M, Du C, et al. Giant dielectric tunability in ferroelectric ceramics with ultralow loss by ion substitution design [J]. *Nature Communications*, 2024, 15(1): 3754.
- [22] Hill M D, Cruickshank D B. Ceramic materials for 5G wireless communication systems [J]. *American Ceramic Society Bulletin*, 2019, 98(6): 20–25.
- [23] Zhou D, Pang L X, Wang D W, et al. High permittivity and low loss microwave dielectrics suitable for 5G resonators and low temperature co-fired ceramic architecture [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2017, 5(38): 10094–10098.
- [24] Ni L Z, Li L X, Du M K. Ultra-high-Q and wide temperature stable  $\text{Ba}(\text{Mg}_{1/3}\text{Ta}_x)\text{O}_3$  microwave dielectric ceramic for 5G-oriented dielectric duplexer adhibition [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 844: 156106.