



国家出版基金项目  
“十二五”国家重点出版物出版规划项目

中国战略性新兴产业——新材料

# 功能陶瓷材料与器件

中国材料研究学会组织编写  
丛书主编◎黄伯云  
编 著◎张启龙 杨 辉 等

中国铁道出版社  
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE



国家出版基金项目

“十二五”国家重点出版物出版规划项目

中国战略性新兴产业——新材料

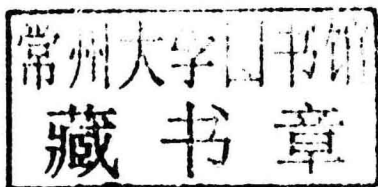
# 功能陶瓷材料与器件

中国材料研究学会组织编写

丛书主编 黄伯云

丛书副主编 韩雅芳

编 著 张启龙 杨 辉 等



中国铁道出版社  
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

## 内 容 简 介

“中国战略性新兴产业——新材料”丛书是中国材料研究学会组织编写的，国家新闻出版广电总局批准为“十二五”国家重点出版物出版规划项目，并获2016年度国家出版基金资助。丛书共16分册，涵盖了新型功能材料、高性能结构材料、高性能纤维复合材料等16种重点发展的材料。本分册为《功能陶瓷材料与器件》。

本书系统地论述了功能陶瓷材料的基本性质和工艺原理，着重论述了微波介质陶瓷及其器件，敏感陶瓷及其元件，电容器陶瓷及MLCC，压电陶瓷及其器件，低温共烧陶瓷、器件及模块等，对国内外功能陶瓷材料的现状和发展从基础理论、关键技术及应用工艺等方面进行了较为详细的论述。

本书可供新材料科研院所、高等院校、新材料产业界、政府相关部门、新材料中介咨询机构等领域的人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

中国战略性新兴产业. 新材料. 功能陶瓷材料与器件/张启龙等编著. —北京:  
中国铁道出版社, 2017. 12  
ISBN 978-7-113-23972-5

I. ①中… II. ①张… III. ①新兴产业-产业发展-研究-中国②陶瓷复合材料-  
产业发展-研究-中国 IV. ①F121.3②F426.71

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 269683 号

书 名：中国战略性新兴产业——新材料  
功能陶瓷材料与器件  
作 者：张启龙 杨 辉 等编著

策 划：李小军 读者热线：(010) 63550836  
责任编辑：李小军 许 璐 包 宁  
封面设计：MX DESIGN  
责任校对：张玉华  
责任印制：郭向伟

出版发行：中国铁道出版社（100054，北京市西城区右安门西街8号）  
网 址：<http://www.51eds.com>  
印 刷：中煤（北京）印务有限公司  
版 次：2017年12月第1版 2017年12月第1次印刷  
开 本：787 mm×1 092 mm 1/16 印张：16.75 字数：355 千  
书 号：ISBN 978-7-113-23972-5  
定 价：78.00 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版图书，如有印制质量问题，请与本社教材图书营销部联系调换。电话：(010) 63550836  
打击盗版举报电话：(010) 51873659

## “中国战略性新兴产业——新材料”丛书

### 编委会

- 主任：黄伯云（中国工程院院士、中国材料研究学会名誉理事长）
- 副主任：韩雅芳（教授、中国材料研究学会副理事长兼秘书长）  
田京芬（中国铁道出版社社长、全国新闻出版行业领军人才）
- 编委：李元元（中国工程院院士、中国材料研究学会理事长）  
魏炳波（中国科学院院士、中国材料研究学会副理事长）  
周 玉（中国工程院院士、中国材料研究学会副理事长）  
谢建新（中国工程院院士、中国材料研究学会常务副理事长）  
郑有焯（中国科学院院士、南京大学教授）  
李 卫（中国工程院院士、北京钢铁研究总院教授级高级工程师）  
潘复生（中国工程院院士、中国材料研究学会副理事长）  
姚 燕（教授、中国材料研究学会副理事长）  
罗宏杰（教授、中国材料研究学会副理事长）  
韩高荣（教授、中国材料研究学会副理事长）  
唐见茂（教授、中国材料研究学会常务理事、咨询专家）  
张新明（教授、俄罗斯工程院院士、俄罗斯宇航科学院院士）  
朱美芳（教授、中国材料研究学会常务理事）  
张增志（教授、中国材料研究学会常务理事兼副秘书长）  
武 英（教授、中国材料研究学会常务理事兼副秘书长）  
赵永庆（教授、中国材料研究学会理事）  
李贺军（教授、中国材料研究学会理事）  
杨桂生（教授、中国材料研究学会理事）  
吴晓东（清华大学材料学院副研究员）

吴 玲(教授、国家新材料行业生产力中心主任)

尚成嘉(北京科技大学教授、中国材料研究学会理事)

徐志康(浙江大学教授)

杨 辉(浙江大学教授)

姜希猛(深圳清华大学研究院研究员)

赵 静(中国铁道出版社总编办主任)

责任编辑:唐见茂

丛书主编:黄伯云

丛书副主编:韩雅芳

## 序

新材料是高技术和现代产业的基础和先导，对培育和发展战略性新兴产业、国家重大工程项目的建设以及可持续发展都具有重要的支撑和保证作用。在我国政府大力支持下，我国新材料在产业规模、技术进步、创新能力、应用水平等方面均取得了重大进展，自主的产业体系初步形成，具备了良好的发展基础。同时，从全球高新技术和新兴产业的发展前景看，新材料的基础地位和先导作用也越来越重要。

“中国战略性新兴产业——新材料”丛书是为贯彻落实国务院2010年颁布的《关于加快培育和发展战略性新兴产业的决定》（国发〔2010〕32号）而组织编著出版的。在国发〔2010〕32号文中，新材料被列为我国七种重点发展的产业之一，其总体目标定位是：“大力发展稀土功能材料、高性能膜材料、特种玻璃、功能陶瓷、半导体照明材料等新型功能材料。积极发展高品质特殊钢、新型合金材料、工程塑料等先进结构材料。提升碳纤维、芳纶、超高分子量聚乙烯纤维等高性能纤维及其复合材料发展水平。开展纳米、超导、智能等共性基础材料研究。”本丛书由中国材料研究学会负责组织编著、中国铁道出版社出版，并成功入选“‘十二五’国家重点出版物出版规划项目”，获得2016年度国家出版基金资助。这是论述我国新材料发展战略的第一部系统性科技系列著作，代表了当代新材料发展的主流，对推动我国战略性新兴产业和可持续发展都具有重要的现实意义和深远的指导意义。

本丛书从发展国家战略性新兴产业的高度出发，重点选择了国发〔2013〕32号文件鼓励的高性能结构材料、特种功能材料和高性能纤维及其复合材料，全面系统阐述了发展这些重点新材料的产业背景及战略意义，系统地论述了这些新材料的理论基础和应用技术、我国取得的最新研究成果、应用方向及发展前景，针对性地提出了我国发展这些新材料的主要方向和任务，分析了存在的主要问题，提出了相应的对策和建议，是我国近年来在新材料领域内具有领先

水平的科技著作丛书。丛书最大的特点是体现了一个“新”字：介绍和论述了我国材料领域取得的最新研究成果、开发的最先进材料品种和最新制造技术，所著内容代表当代全球新材料发展方向和主流。丛书既具有较高的学术性和技术先进性，同时对我国新材料产业发展也具有重要的参考价值。

中国材料研究学会是全国一级学术团体，具有资源、信息和人才的综合优势，多年来在促进材料科学进步、开展国内外学术交流、承接政府职能转移、提供新材料产业发展决策咨询、开展社会化服务等方面做了大量的、卓有成效的工作，为推动我国新材料发展发挥了重要作用。参加本丛书编著的作者都是我国从事相关材料研究和开发的一流的科研单位和院校、一流的专家学者，拥有数十年的科研、教学和产业开发经验，并取得了国内领先的科研成果，创作态度严谨，从而保障了本套丛书的内容质量。

本丛书的编著和出版是近年来我国材料研究领域具有足够影响的一件大事。我们希望，本丛书的出版能对我国新材料技术和产业发展产生较大的助推作用，也热切希望广大材料科技人员、产业精英、决策机构积极投身到发展我国新材料研发的行列中来，为推动我国新材料产业又好又快的发展做出更大贡献！

中国材料研究学会名誉理事长

中国工程院院士



2016年6月

## 前 言

“中国战略性新兴产业——新材料”丛书是中国材料研究学会组织编写的,国家新闻出版广电总局批准为“十二五”国家重点出版物出版规划项目。

根据国务院《关于加快培育和发展战略性新兴产业的决定》,新材料被列为我国战略性新兴产业之一。本丛书定位为:从战略性新兴产业的高度,着重论述该类新材料在国民经济和国防建设重大工程和项目中的地位 and 作用、技术基础、最新研究成果、应用领域及发展前景。其特点是体现一个“新”字,即在遵守国家有关保密规定的前提下论述当代新材料的最先进的工艺和最重要的性能。它代表当代全球新材料发展主流,对实现可持续发展具有重要的现实意义和深远的指导意义。丛书共 16 分册,涵盖了新型功能材料、高性能结构材料、高性能纤维复合材料等 16 种重点发展材料。本分册为《功能陶瓷材料与器件》。

功能陶瓷材料与器件作为新材料的重要组成部分,因具有优异的特性越来越受到各国政府、科技界和企业界的高度重视。随着微电子技术、光电子技术、计算机技术、移动通信、网络技术等高新技术的发展,以及高纯超微粉体、厚膜和薄膜等制备技术的进一步完善,功能陶瓷在新材料体系探索,现有材料潜在功能开发,材料、器件一体化及应用等方面都取得了突出的进展,成为材料科学和工程应用中最活跃的研究领域之一。

本书从功能陶瓷材料与器件基础理论、关键技术及应用工艺等多方面进行了较详细的论述。其中,第 1 章论述了功能陶瓷材料的界定、简要发展历程、分类、品种范围和性能特点及发展前景展望;第 2 章论述了微波介质陶瓷及其器件的概念,研究概况、主要微波介质材料体系、关键微波介质陶瓷器件、应用实例、市场前景及发展趋势;第 3 章论述了热敏、压敏、气敏陶瓷及元件基本特性,研究现状,主要材料体系及发展趋势;第 4 章论述了电容器陶瓷的概念、研究概况、材料-组成-性能关系、片式多层陶瓷电容器(MLCC)概述、国内外产业现状及发展趋势;第 5 章论述了压电陶瓷效应、主要特性参数、几类材料体系研究进展与发展现状和趋势、主要压电陶瓷器件;第 6 章论述了低温共烧陶瓷(LTCC)技术特点、材料种类及发展现状、器件及模块设计方法与实例、技术重点工艺发展、器件及模块研究概况、产业现状及发展趋势;第 7 章论述了功能陶瓷材料与器件国内外发展概况及



总体趋势,我国功能陶瓷材料及器件发展机遇及存在的问题、主要任务、应对策略以及典型企业。

本书的特色在于,以不同功能类型的陶瓷材料为主线展开讨论,注重理论分析、材料研制以及器件应用的有机结合,着重分析材料结构、物理性能及其形成机理、器件结构设计及制造工艺,特别关注材料特性、工艺技术与器件性能之间的内存关联。目前,制约我国功能陶瓷材料与器件的关键问题是材料研制、器件设计及工艺技术研究相互脱节,协调不足,编著此书希望能在这方面起到一定的推动作用。

参加本书编著的人员有:浙江大学张启龙(第1章、第4章、第5章和第6章第1~6节);浙江大学杨辉(第2章、第6章第7~11节和第7章)、浙江大学徐诺心(第3章)。本书从提纲审定到编写的全过程,得到了浙江加州国际纳米技术研究院的大力支持和帮助,还得到申乾宏、张剑、胡靓等同志的热情指导与帮助,在此一并感谢。

由于作者水平和经验有限,加上功能陶瓷材料与器件的快速发展,本书难免存在一些不足,敬请广大同行、读者积极提出宝贵意见。

编著者  
2017年4月

# 目 录

第 1 章 概 论 .....	1
1.1 功能陶瓷材料的界定 .....	1
1.2 功能陶瓷材料发展历程 .....	1
1.3 功能陶瓷材料分类、品种范围及性能特点 .....	2
1.4 功能陶瓷材料发展前景展望 .....	3
第 2 章 微波介质陶瓷及其器件 .....	5
2.1 微波介质陶瓷的概念 .....	5
2.1.1 微波及其特点 .....	5
2.1.2 微波介质陶瓷的概念及应用背景 .....	7
2.2 微波介质陶瓷材料的性能指标及优化 .....	7
2.2.1 介电常数 .....	7
2.2.2 品质因数 .....	8
2.2.3 频率温度系数 .....	10
2.2.4 微波介质陶瓷的性能优化 .....	11
2.3 微波介质陶瓷材料的国内外研究现状 .....	13
2.3.1 微波介质陶瓷的发展历史 .....	13
2.3.2 微波介质陶瓷的研究概况 .....	14
2.3.3 微波介质陶瓷的主要体系 .....	16
2.3.4 纳米微波介质陶瓷粉体的制备与应用 .....	31
2.4 微波介质陶瓷器件 .....	36
2.4.1 微波谐振器件 .....	36
2.4.2 微波介质滤波器 .....	38
2.4.3 微带天线 .....	40
2.4.4 微波介质陶瓷器件制备工艺 .....	41
2.4.5 微波介质陶瓷器件研究现状 .....	51
2.5 微波介质陶瓷器件应用实例及市场前景 .....	52
2.5.1 移动通信用微波介质陶瓷器件 .....	53
2.5.2 卫星电视接收机高频头 .....	53

2.5.3	GPS 微波介质天线 .....	54
2.6	微波介质陶瓷及器件的发展趋势 .....	55
	参考文献 .....	57
<b>第 3 章</b>	<b>敏感陶瓷及其元件 .....</b>	<b>68</b>
3.1	热敏陶瓷 .....	68
3.1.1	基本参数 .....	68
3.1.2	正温度系数热敏电阻 PTC 效应及模型 .....	70
3.1.3	PTC 热敏电阻的主要特性 .....	72
3.1.4	热敏陶瓷及元件的研究现状 .....	73
3.1.5	PTC 热敏陶瓷的发展前景 .....	77
3.2	压敏陶瓷 .....	77
3.2.1	压敏陶瓷的基本性能 .....	78
3.2.2	压敏电阻导电机理 .....	79
3.2.3	压敏电阻的研究现状 .....	80
3.3	气敏陶瓷 .....	86
3.3.1	SnO <sub>2</sub> 气敏陶瓷 .....	86
3.3.2	ZrO <sub>2</sub> 气敏陶瓷 .....	88
3.3.3	TiO <sub>2</sub> 气敏陶瓷 .....	90
3.3.4	国内外气敏陶瓷传感器发展 .....	90
3.3.5	国内外气敏陶瓷材料进展 .....	90
3.3.6	气敏陶瓷材料发展趋势 .....	94
	参考文献 .....	95
<b>第 4 章</b>	<b>电容器陶瓷及 MLCC .....</b>	<b>100</b>
4.1	电容器陶瓷的概念 .....	100
4.2	电容器陶瓷的国内外研究概况 .....	101
4.2.1	电容器陶瓷的发展历史 .....	101
4.2.2	电容器陶瓷相关研究的文献计量 .....	101
4.3	陶瓷介质材料介电性能 .....	103
4.3.1	介质的极化及介电常数 .....	103
4.3.2	介电损耗 .....	106
4.3.3	介电强度 .....	107
4.3.4	绝缘电阻 .....	107
4.3.5	电容温度系数 .....	108
4.4	非铁电电容器陶瓷 .....	108

4.4.1	高频温度补偿型电容器陶瓷	109
4.4.2	高频温度稳定型介电陶瓷	111
4.5	铁电电容器陶瓷	112
4.5.1	铁电相变与自发极化	112
4.5.2	铁电晶体的电畴结构	113
4.5.3	电致伸缩和电滞回线	114
4.5.4	铁电陶瓷的温度特性	115
4.5.5	铁电陶瓷的击穿	116
4.5.6	铁电陶瓷的非线性	117
4.5.7	铁电陶瓷的老化	117
4.5.8	钛酸钡基陶瓷的研究现状	118
4.6	反铁电电容器介质陶瓷	125
4.6.1	反铁电体的自发极化状态	125
4.6.2	反铁电体的电畴结构	126
4.6.3	反铁电体的主要性质	126
4.6.4	反铁电介质陶瓷的应用	128
4.7	半导体电容器介质陶瓷	128
4.7.1	基本概念	128
4.7.2	陶瓷的半导化	129
4.7.3	半导体陶瓷电容器的分类及性能	129
4.8	巨介电常数陶瓷	132
4.8.1	$\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ 的晶体结构	132
4.8.2	$\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ 的巨介电性质及其机制	132
4.8.3	$\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ 的改性	133
4.9	其他特殊陶瓷电容器材料	135
4.9.1	抗还原性电容器介质陶瓷	135
4.9.2	中高压陶瓷电容器材料	137
4.10	陶瓷/聚合物复合材料	138
4.10.1	复合材料介电性能的理论模型	139
4.10.2	陶瓷/有机复合材料常用制备方法	140
4.10.3	陶瓷/有机复合材料的研究现状	140
4.11	片式多层陶瓷电容器(MLCC)	143
4.11.1	片式多层陶瓷电容器概述	144
4.11.2	片式多层陶瓷电容器内电极基本结构	145
4.11.3	片式多层陶瓷电容器制造工艺	146

4.11.4	片式多层陶瓷电容器分类 .....	147
4.11.5	国内外 MLCC 产业的发展概况 .....	149
4.11.6	MLCC 技术发展趋势 .....	152
	参考文献 .....	154
<b>第 5 章</b>	<b>压电陶瓷及其器件 .....</b>	<b>161</b>
5.1	压电效应 .....	161
5.2	压电陶瓷材料极化 .....	162
5.3	压电陶瓷材料主要特性参数 .....	163
5.4	压电陶瓷研究进展 .....	164
5.4.1	压电陶瓷相关研究的文献计量 .....	165
5.4.2	压电陶瓷材料发展现状 .....	166
5.5	压电陶瓷器件及发展现状 .....	171
5.5.1	压电振子与压电陶瓷频率控制器件 .....	171
5.5.2	压电变压器 .....	171
5.5.3	压电换能器 .....	173
5.5.4	压电超声马达 .....	174
5.6	压电陶瓷的发展趋势 .....	176
5.6.1	无铅压电陶瓷 .....	176
5.6.2	压电复合材料 .....	176
5.6.3	纳米压电陶瓷 .....	177
5.6.4	高居里温度压电陶瓷 .....	177
	参考文献 .....	177
<b>第 6 章</b>	<b>低温共烧陶瓷、器件及模块 .....</b>	<b>181</b>
6.1	LTCC 技术概述 .....	181
6.1.1	LTCC 技术工艺过程 .....	182
6.1.2	LTCC 技术特点 .....	183
6.2	低温共烧陶瓷材料的要求 .....	184
6.2.1	烧结温度 .....	184
6.2.2	介电性能 .....	185
6.2.3	热膨胀系数 .....	186
6.2.4	机械强度 .....	186
6.2.5	共烧材料的匹配性 .....	187
6.3	低温共烧陶瓷的种类 .....	188
6.3.1	微晶玻璃 .....	188

6.3.2	陶瓷十助剂 .....	189
6.3.3	单相陶瓷 .....	190
6.4	低温共烧陶瓷相关研究的文献计量 .....	190
6.5	低温共烧陶瓷材料进展 .....	192
6.5.1	低温共烧陶瓷基板材料 .....	192
6.5.2	低温共烧陶瓷微波元器件材料 .....	195
6.6	LTCC 器件及模块设计方法与实例 .....	205
6.6.1	LTCC 器件及模块设计方法 .....	205
6.6.2	LTCC 器件设计与制作实例 .....	207
6.7	LTCC 技术重点工艺技术的发展 .....	215
6.7.1	LTCC 膜片成型技术 .....	215
6.7.2	平面零收缩基板制作工艺 .....	221
6.7.3	精密细线条制作工艺 .....	223
6.7.4	空腔基板制作工艺 .....	224
6.8	低温共烧陶瓷技术的应用 .....	225
6.9	低温共烧陶瓷器件及模块研究进展 .....	226
6.9.1	单一功能元件 .....	226
6.9.2	LTCC 功能模块 .....	231
6.10	低温共烧陶瓷的产业概况 .....	233
6.11	低温共烧陶瓷技术发展趋势 .....	235
	参考文献 .....	236
<b>第 7 章 国内功能陶瓷材料产业发展现状、趋势及主要任务 .....</b>		<b>245</b>
7.1	国内外发展概况及总体趋势 .....	245
7.2	我国功能陶瓷材料及器件发展机遇及存在的问题 .....	248
7.3	发展我国功能陶瓷材料产业的主要任务及应对策略 .....	249
7.4	典型企业 .....	250

# 第 1 章 概 论

## 1.1 功能陶瓷材料的界定

陶瓷制品在我国有着悠久的历史,中国人早在公元前 8000~公元前 2000 年(新石器时代)就发明了陶器。陶瓷的传统概念是“由黏土或主要含黏土的混合物,经成型、干燥、烧制而成的制品”的总称。随着信息、能源、环保和生物科学与技术的迅速发展,陶瓷材料获得了新的长足的进步。所谓功能陶瓷是区别于大家熟知的日用瓷、艺术瓷、建筑瓷以及单纯考虑力学性能的结构瓷,它是以电、磁、光、声、热、力和生物等信息的检测、转化、耦合、传输、处理和存储等功能为特征的新型材料,已经成为微电子技术、激光技术、传感技术、光纤技术以及空间技术等现代高技术发展不可替代的重要支撑材料,在通信电子、自动控制、集成电路、计算机、信息处理等方面的应用日趋普及。如手机、无线网络通信用微波介质陶瓷滤波器和天线,集成电路封装用 LTCC(低温共烧陶瓷)基片。

功能陶瓷材料是电子材料中最重要的一个分支,其产值约占整个新兴陶瓷产业产值的 70%。近代科学技术的高速发展对功能陶瓷材料提出的要求越来越高,这标志着功能陶瓷对高新科学技术的发展起着越来越关键的作用。例如,一个集成电路的稳定性和使用寿命,在很大程度上取决于它的基片或管壳性能;一个自动控制系统的调节范围、精度和灵敏度等主要指标,往往取决于传感器的性能,而制造传感器的主要材料是功能陶瓷。

## 1.2 功能陶瓷材料发展历程

功能陶瓷与传统陶瓷相比在原料及工艺等方面有很大的区别,是知识和技术密集型产品。功能陶瓷材料之所以具有卓越的功能及特性,不仅与材料的化学组成有关,而且在很大程度上取决于其微观结构。功能材料的开发,首先依赖于新材料的发现和人工合成。功能陶瓷的发展始于 20 世纪 30 年代,经历从电介质陶瓷、压电铁电陶瓷、半导体陶瓷、快离子导体陶瓷、高温超导陶瓷的发展过程。1941 年美国首先制成介电常数高达 1 100 的钛酸钡铁电陶瓷。1947 年,美国 Roberts 在  $\text{BaTiO}_3$  陶瓷上,施加高压进行极化处理,获得了压电陶瓷的压电性;随后日本积极开展利用  $\text{BaTiO}_3$  压电陶瓷制作换能器、高频换能器、压力传感器、滤波器、谐振器等各种压电陶瓷器件。1955 年 W. Haayman 等人发现,在高纯  $\text{BaTiO}_3$  陶瓷中加入微量稀土氧化物,其室温电阻率将大幅度下降,并且发现某一温度范围内,其电阻率可提高几个数量级,由此开拓了 PTC 材料的广泛应用;20 世纪 60 年代初期,用于晶体管电路的温度补偿 PTC 元件最早实现商品化,随后用于电动机过热保护、彩电消磁限流及恒温发热等场合

的系列化 PTC 元件相继实现规模化生产。20 世纪 70 年代初,美国的 Bryan 等首先研制成介电常数为 38 的微波介质  $\text{BaTi}_4\text{O}_9$  材料;接着,美国 Bell 实验室成功研制了温度稳定性好的微波介质  $\text{Ba}_2\text{Ti}_9\text{O}_{20}$ ,实现了介质谐振器的实用化,开拓了介质陶瓷在微波频段上的使用。1986 年,瑞士 Muller 和德国 Bednorz 发现  $\text{LaBaCuO}$  氧化物陶瓷具有 35 K 的高温超导性,打破了传统“氧化物陶瓷是绝缘体”的观念,引起世界科学界的轰动,并于 1987 年获诺贝尔物理学奖。功能陶瓷目前已发展成为性能多样、品种繁多、使用广泛、市场占有率很高的一类先进陶瓷材料。

### 1.3 功能陶瓷材料分类、品种范围及性能特点

目前已经研究比较深入的功能陶瓷有电容器陶瓷、微波介质陶瓷、敏感陶瓷、压电陶瓷、绝缘陶瓷、导电陶瓷、生物陶瓷和结构陶瓷等。下面将介绍几种主要的功能陶瓷及其应用。

(1) 电容器陶瓷:用于高频电路的温度稳定的电容器陶瓷,如钛酸钡瓷、镁镧钛瓷、钙钛硅瓷等;用于高频电路起温度补偿作用电容器陶瓷,如金红石瓷、钛酸钙瓷、钛锶铋瓷、锡酸盐和锆盐瓷等;还有用于高频高功率电路、高压电路和高脉冲电路的多种陶瓷。另外,还有具有高介电常数的铁电陶瓷,它可以制造体积小、电容量大的电容器,用于低频、高频、脉冲储能电路;介电常数很高,且对温度相当稳定的半导体陶瓷电容器,亦称晶界层电容器,它具有高的可靠性,用于要求稳定性和可靠性高的电路。

(2) 微波介质陶瓷:微波介质陶瓷(MWDC)是指应用于微波频段(主要是 UHF、SHF 频段,300 MHz~300 GHz)电路中作为介质材料,并完成一种或多种功能的陶瓷。目前,微波介质陶瓷已在便携式移动电话、汽车电话、无绳电话、电视卫星接收器、军事雷达等方面被用来广泛制造微波介质滤波器和谐振器,在现代通信工具的小型化、集成化过程中正发挥着越来越大的作用。

(3) 敏感陶瓷:敏感陶瓷是指当作用于这些材料制作的元件上的某一个外界条件,如温度、压力、湿度、气氛、电场、光及射线等改变时,会引起该材料某种物理性能的变化,从而能从这种元件上准确迅速地获得某种有用的信号。主要有热敏陶瓷、压敏陶瓷、气敏陶瓷、湿敏陶瓷等。

(4) 压电陶瓷:压电陶瓷的晶体结构上没有对称中心,因而具有压电效应,即具有机械能与电能之间的转换和逆转换的功能。压电陶瓷材料具有成本低、换能效率高、加工成型方便等优点,常用于制作压电谐振器、滤波器、换能器、超声波发生器和变压器等。常用的压电元件有:传感器、气体点火器、报警器、音响设备、医疗诊断及通信设备等。代表性陶瓷材料有  $\text{PbTiO}_3$ 、 $\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$  陶瓷、 $\text{PbZrO}_3$  等。

(5) 绝缘陶瓷:是以黏土为代表的硅酸盐矿物烧制而成,由于这些制品本身是绝缘的,故称为绝缘陶瓷。主要用作绝缘支柱、板、管等各种绝缘子和紧固件,广泛应用于汽车、电力、计算机等领域。目前器件主要有绝缘子、火花塞、电阻器基体材料和集成电路基片等。

(6) 导电陶瓷:通常陶瓷不导电,是良好的绝缘体。然而,某些氧化物陶瓷加热时,处于原



子外层的电子可以获得足够的能量,以便克服原子核对它的吸引力,而成为可以自由运动的自由电子,这种陶瓷就变成导电陶瓷。如 SiC、ZrO<sub>2</sub>、MoSi<sub>2</sub> 等高温电子导电陶瓷材料, SrCeO<sub>3</sub> 系高温型质子导电陶瓷等,可用作高温发热体、微波吸收材料、大功率电阻器等。

(7) 生物陶瓷:生物陶瓷是指用作特定的生物或生理功能的一类陶瓷材料,即直接用于人体或与人体直接相关的生物、医用、生物化学等的陶瓷材料。生物陶瓷的应用范围也正在逐步扩大,现可应用于人工骨、人工关节、人工齿根、骨充填材料、骨置换材料、骨结合材料,还可应用于人造心脏瓣膜、人工肌腱、人工血管、人工气管等。

进入新世纪以来,在探索信息技术进一步发展的空间时,世界形成了各类元器件“大集成”共识,认为低温共烧陶瓷(LTCC)技术是迎接新一代元器件时代来临,实现新型电子元件的最佳技术。LTCC 最初是 1982 年休斯公司开发的新型材料,它采用厚膜材料,根据共烧陶瓷设计的结构制造,主要用于实现高集成度、高性能电子封装的技术方面,在设计的灵活性、布线密度和可靠性方面提供了巨大的潜能。LTCC 技术是一种先进的混合电路封装技术,可将滤波器、天线、电容器、电感器、变压器等无源分立器件配置于多层布线基板中,与有源器件共同集成为一个完整的电路系统。因此,LTCC 技术又称为混合集成技术。LTCC 的特色在于可以使用平行式的制程,具有以下特点:①烧结温度低于 1 000 °C;②热膨胀系数与半导体匹配;③具有较高的电路密度及散热能力;④可以制作极高层数的器件及模块;⑤产品可靠性高;⑥可降低产品的质量及减小体积。

本书主要介绍使用量大、面广的电容器陶瓷、微波介质陶瓷、敏感陶瓷、压电陶瓷及其器件的基本特性、应用及产业现状,以及实现各类元器件“大集成”的低温共烧陶瓷。

## 1.4 功能陶瓷材料发展前景展望

功能陶瓷及其器件是移动通信、计算机、自动化控制、数字家电等整机设备的基础,是现代科学技术的一个先行领域,其发展水平直接影响着整机设备的发展。随着世界经济与科技水平提高,智能手机、笔记本式计算机、数码产品、穿戴式设备等消费电子市场需求旺盛,对电容器、滤波器、天线、传感器、电阻器、微驱动器等功能陶瓷及器件的需求越来越大。以片式多层陶瓷电容器(MLCC)为例,单台笔记本式计算机 MLCC 用量为 350~800 颗,单台液晶(LCDTV)用量为 500~750 颗,单部手机 MLCC 用量为 100~300 颗。随着产品的升级,单机用量将呈现上升趋势,元件尺寸和性能要求越来越高,如一部智能手机上搭载约 700 个 MLCC,微型、超微型、高频、高精度 MLCC 将成为 4G/LTE 智能手机方案选型的首选。在宽带无线移动通信、下一代网络关键技术与服务、数字化和智能化设计制造、流程工业的自动化及装备、高清晰度大屏幕平板显示等重大技术发展的推动下,功能陶瓷及器件必将带来广阔的发展空间和新一轮的技术革新。

近年来,功能陶瓷成为国际上最具活力的陶瓷行业,世界各国对功能陶瓷及器件研究异常活跃。美国将功能陶瓷列为精细陶瓷工业发展重点之一,已在 MLCC 瓷粉、高频或超高频 MLCC、高压 MLCC、LTCC 膜带等功能陶瓷及器件研制与生产占主导地位,基本垄断国防军