

# 功能陶瓷研究进展与发展趋势<sup>\*</sup>

董显林

(上海硅酸盐研究所 上海 200050)

**摘要** 简要评述了陶瓷基板,微波介质陶瓷,铁电压电陶瓷,半导体陶瓷,铁电薄膜和智能材料等功能陶瓷的研究进展和发展趋势,对我院功能陶瓷的发展提出了一些建议。

**关键词** 功能陶瓷,陶瓷基板,微波介质陶瓷,铁电压电陶瓷,半导体陶瓷,铁电薄膜,智能材料



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,目前已发展成为性能多样、品种繁多、使用广泛、市场占有份额很高的一大

类先进陶瓷材料。近十年来,在人类社会对能源、计算机、信息、激光和空间等现代技术的迫切需求的牵引下,随着微电子技术、光电子技术、计算技术等高新技术的发展以及高纯超微粉体、厚膜和薄膜等制备工艺的进一步完善,功能陶瓷在新材料探索、现有材料潜在功能的开发和材料、器件一体化以及应用等方面都取得了突出的进展,成为材料科学和工程中最活跃的研究领域之一,也成为现代微电子技术、光电技术、计算技术、激光技术等许多高技术领域的重要基础材料。

当前功能陶瓷发展的趋势可以归纳为以下几个特点:复合化,多功能化,低维化,智能化和设计、材料、工艺一体化。单一材料的特性和功能往往难以满足新技术对材料综合性能的要求,材料复合化技术可以通过加和效应与耦合乘积效应开发出原材料并不存在的新的功能效应,或获得远高于单一材料的综合功能效应。最近提出的梯度功能材料也可看作一类特殊的复合材料。功能性与结构性结合

的材料,或者具有多种良好功能性的材料,为提高产品的性能和可靠性,促使产品向薄、轻、小发展提供了基础。当材料的特征尺寸小到纳米级,由于量子效应和表面效应十分显著,可能产生独特的电、磁、光、热等物理和化学特性,功能陶瓷进入纳米技术领域是研究的热点之一,如铁电薄膜和超细粉体的制备等。智能材料是功能陶瓷发展的更高阶段,它是人类社会的需求和现代科学技术发展的必然结果。

## 1 国际研究现状和发展趋势

### 1.1 陶瓷基板

目前已开发应用和用于实际生产的陶瓷基板材料主要有  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{BeO}$ 、 $\text{AlN}$  和玻璃陶瓷等。 $\text{Al}_2\text{O}_3$  具有良好的绝缘性和化学稳定性,是目前应用最成熟的陶瓷基板材料,但其热导率低且介电常数和热膨胀系数均大于单晶硅,因而不能很好地用于大规模特别是超大规模集成电路。 $\text{SiC}$  和  $\text{BeO}$  是比较理想的材料,但前者烧结困难,后者的毒性大且成本高,限制了它在生产和应用中的推广。 $\text{AlN}$  具有很高的热导率,热膨胀系数与  $\text{Si}$  接近,适用于大功率半导体基片,如厚膜和薄膜电路基片、金属化基片、直接覆铜基片和多层共烧基片。 $\text{AlN}$  同时还具有高机械强度、良好的绝缘性、低介电常数以及制作技术的可控性等综合性能,已成为目前最有希望的一种高热导陶瓷基板材料。产量年增长率比  $\text{Al}_2\text{O}_3$  高 4—8 倍,今后可以取代  $\text{BeO}$ 、 $\text{SiC}$ ,甚至部分取代  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 。一些发达国家自 20 世纪 80 年代以来,都相继投入

<sup>\*</sup> 修改稿收到日期:2003 年 11 月 5 日

巨资和大量的科研力量进行 AlN 陶瓷基板的研究、开发和应用,其中日本开展最早,技术也最成熟,美国、德国、英国、印度和法国也在加紧研究,并取得了令人瞩目的成就,已有商品化 AlN 基板出售,热导率一般为 140—170 W/m·k,最高达 200 W/m·k,基板尺寸为 50×50mm<sup>2</sup>,最大达 115×115mm<sup>2</sup>。最近,日、美为了占领 AlN 基板的国际市场,正在开展“以低成本工艺制备高性能氮化铝陶瓷”研究。AlN 基板金属化及其浆料的制备研究将是今后世界各国竞相研究的热点技术之一。

低温共烧 Mg-Al-Si 玻璃陶瓷基板 (LTCC 基板)的研究和开发在日本很受重视。其优点是介电常数低,对高速传输的延迟信号影响小,有利于高速计算机的发展;烧结温度低(900℃),热膨胀系数与芯片材料匹配,可采用低电阻材料(Ag,Ag-Pb)和贱金属(Cu)进行布线,有利于集成陶瓷电子电路的发展。总体设想是在三维立体多层陶瓷封装组件的层间埋置电子元件进行低温共烧形成整体。近年来,将电容器、电阻器埋置在多层陶瓷布线中,共烧成整体已经实现,其它元件的埋置共烧正在研究之中。

金属电路片 / 陶瓷基板(DBC 陶瓷)以及有机粘结剂与陶瓷材料制成的复合基板在微波半导体部件和混合电路基板方面有着良好的发展前景。

1.2 微波介质陶瓷

微波介质陶瓷(MWDC)是现代通信中广泛使用的谐振器、滤波器、介质基片、介质天线、介质导波回路等微波元器件的关键材料。目前微波介质陶瓷的研究十分活跃,发展迅速,其推动力主要来自于商用无线通信高速发展的需求,如蜂窝式移动通信系统、电视接受系统、直接广播系统和卫星通信系统等。

对微波介质陶瓷的基本要求是:在所使用的微波波段内,介电常数  $\epsilon$  要大,以便于微波介质元器件小型化;品质因数  $Q$  值要高或介电损耗  $\text{tg}\delta$  要小,以保证获得良好的滤波特性和通讯质量;谐振频率的温度系数  $\tau_f$  尽可能小或可调节,保证器件的热稳定性。此外也要考虑材料的传热系数,绝缘电阻,体积密度和可加工性等因素。

当前,正在开发的 MWDC 主要集中在以下三个

系统:

(1) 低  $\epsilon$  和高  $Q$  值的 MWDC: 主要是 BaO—MgO—Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>,BaO—ZnO—Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 或 BaO—MgO—Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>,BaO—ZnO—Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 系材料,或它们之间的复合材料<sup>[1]</sup>。在  $f \geq 10\text{GHz}$  下, $\epsilon=25\sim 30$ , $Q=(1\sim 3)\times 10^4$ , $\tau_f \approx 0$ 。可用于厘米、毫米波段使用的卫星直播等微波通信系统。

(2) 中等  $\epsilon$  和  $Q$  值的 MWDC: 主要是以 BaTi<sub>4</sub>O<sub>9</sub>,Ba<sub>2</sub>Ti<sub>9</sub>O<sub>20</sub> 和(Zr,Sn)TiO<sub>4</sub> 等为基的材料。在  $f=3\sim 4\text{GHz}$  下,其  $\epsilon \approx 40$ , $Q=(6\sim 9)\times 10^3$ , $\tau_f \leq 5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 。可用作微波军用雷达及微波通信系统中的介质谐振器件。

(3)高  $\epsilon$  和较低  $Q$  值的 MWDC:主要是以 BaO—Ln<sub>2</sub>O<sub>3</sub>—TiO<sub>2</sub>(简称 BLT)为基的材料,其中 Ln 为 Nd、Sm、La 等镧系稀土元素。BLT 系在目前微波介质陶瓷研究中最受重视,原因是容易获得  $\epsilon \geq 80$ ,甚至可能达到 90—100,而且在适当的配方和工艺条件下,可同时获得较高的  $Q$  值和较低的  $\tau_f$  值。如添加 7mol%PbO 的 BaO—Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>—TiO<sub>2</sub> 系材料在 3GHz 下,其  $\epsilon=88$ , $Q=2000$ , $\tau_f=0$ 。这类材料可用于蜂窝移动通信系统。近年来,BaO—TiO<sub>2</sub>—Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 体系的微波介电特性引起了人们的注意,因为其填满型四方钨青铜结构化合物具有比 BLT 系更高的  $\epsilon \geq 110$ 。此外还有复合钙钛矿 CaO—Li<sub>2</sub>O—Ln<sub>2</sub>O<sub>3</sub>—TiO<sub>2</sub> 系列和铅基钙钛矿 (Pb<sub>1-x</sub>Cax)ZrO<sub>3</sub>、(Pb<sub>1-x</sub>Cax)HfO<sub>3</sub>、(Pb<sub>1-x</sub>Cax)(Fe<sub>1/2</sub>Nb<sub>1/2</sub>)O<sub>3</sub>、(Pb<sub>1-x</sub>Cax)(Mg<sub>1/3</sub>Nb<sub>2/3</sub>)O<sub>3</sub> 系列材料等。

目前微波介质陶瓷仍主要采用常规的固相反应方法制备,近几年国外已采用超微粉末制备技术、高致密成型技术、特种烧结技术以及热处理技术等先进制备工艺,这对提高瓷料的组成均匀性,降低烧结温度,改善烧结性能和微波介电性能有很好的效果。

随着微波技术不断推向毫米波和亚毫米波的高频方向以及移动通信和便携式终端向着小型化、轻量化、集成化、高可靠性和低成本方向发展,寻找高  $\epsilon$ 、高  $Q$  值和低  $\tau_f$  的新材料成为当今微波介质陶瓷研究中的一个十分活跃的热点。多层片式元件是实现移动通信终端更进一步小型化的惟一途径,低温烧结是微波介质陶瓷研究的一个重要方向,低温烧结不仅有利于元器件的“独石”化,也有利于降低

能耗及选用廉价金属作为电极材料,从而降低生产成本。

1.3 铁电压电陶瓷材料

铁电压电陶瓷作为机、电、声、光、热敏感材料,在传感器、换能器、无损检测和通讯技术领域已获得了广泛的应用。经过 50 多年的发展,目前铁电压电陶瓷材料的应用已遍及人们日常生活的每个角落,并在军事装备中占有极其重要的地位。世界各国都高度重视铁电压电陶瓷材料的研究和开发,研究的重点主要是从已知材料中发掘新效应,开拓新应用,同时从控制材料组织和结构入手,寻找新的压电材料。近年来,压电陶瓷在全球的年销量按 15%左右的速度增长,据统计,2000 年全球压电陶瓷产品销售额达 30 亿美元以上。

目前国内外主要研究和开发的热点是:

(1)无铅压电陶瓷。日本在无铅压电陶瓷的研究和开发上,论文和专利的数量最多,在世界上占主导地位。但总体上讲,无铅压电陶瓷的性能与铅基陶瓷相比,还存在较大的差距,要获得与 PZT 基压电陶瓷性能相近的无铅体系,还需进行大量深入的研究工作。最近几年,钛酸铋钠( $\text{Na}_{1/2}\text{Bi}_{1/2}$ ) $\text{TiO}_3$  系统<sup>[2]</sup>和含铋层状结构无铅压电陶瓷的研究和开发极为活跃,它们有可能在某些电子产品中得到实际应用。

(2)弛豫铁电单晶体。1997 年国际上在弛豫铁电单晶体的研究上取得了突破性进展,成功地生长出接近实用要求的大尺寸 PMN-PT 和 PZN-PT 单晶体,其机电耦合系数  $k_{33}$  高达 92%以上,压电系数  $d_{33}$  达  $2000\times 10^{-12}\text{C/N}$ , $[001]$ 方向上的电致应变为 1.7%,储能密度达到了  $130\text{J/kg}$ <sup>[3]</sup>。所有这些指标均远超过了现有的各种电致伸缩材料和压电材料,为医学超声成像、声呐探测、高应变驱动器、高密度储能器和机敏材料系统提供了一种前所未有的新材料,引发了这一领域的革命性变革。美、日等国非常重视新型弛豫铁电单晶的应用前景,近年来已投入了大量的资金,进行此类单晶的制备和相关器件的研究。

(3)压电陶瓷——高聚物复合材料。目前压电复合材料研究在国际上异常活跃。自 Newnham 提出连通性概念及 10 种连通模式之后,20 多年来此类

材料发展十分迅速,应用范围也从水声器扩展到无损探伤、超声成像、压电传感器、热释电传感器、宽带横波换能器、非均匀振动换能器及智能材料系统等领域。为使压电复合材料具有更精密的空间结构,一系列新的成型工艺,包括脱模法、注模成型法、遗留法、层压法、纤维编织法、喷射法、共挤出法等应运而生,可获得精度在  $50\text{--}100\mu\text{m}$  甚至  $20\mu\text{m}$  的精细结构。新兴的快速成型工艺为制作几何形状独特的压电复合材料提供了可能,如陶瓷柱呈 Z 形排列的 1-3 复合材料,螺旋形和套筒形复合材料。

此外,高居里点压电陶瓷,晶粒取向压电陶瓷,PLZT 透明铁电陶瓷和薄膜,各向异性压电陶瓷和细晶粒压电陶瓷等也是目前压电陶瓷材料研究的重点课题。

1.4 半导体陶瓷材料

正温度系数热敏陶瓷(PTC)和负温度系数热敏陶瓷(NTC)是目前应用最为广泛的两类热敏电阻。近年来,随着通信技术的迅猛发展,对于程控电话交换机用 PTC 过电流保护元件、移动电话石英晶体振荡器用 PTC 恒温器、NTC 温度补偿器和充电器电路的过电流保护元件等需求剧增。为了降低汽车尾气排放和提高冷启动速度,需要大量汽车冷启动用 PTC 加热片。另外,PTC 热敏陶瓷在彩电消磁器,空调器,暖风机,节能灯软启动等家用电器方面得到了普遍应用。值得注意的是,PTC 和 NTC 在航空航天、雷达、电子通信、仪器仪表等领域占有非常重要的地位。目前,源于多层陶瓷电容器(MLCC)的独石型结构和工艺在敏感元件领域的移植是一个重要发展趋势,NTC 已实现 0603、0805、1206 等标准尺寸规格,以适应电子产品普遍采用的表面贴装技术(SMT),PTC 的表面贴装元件已在逐步开发和生产。

气敏陶瓷的材料系统很多, $\text{SnO}_2$  气敏传感器至今仍是应用最广和性能最优的一种,对许多可燃气体,如氢、一氧化碳、甲烷、丙烷、乙醇、丙酮、城市煤气和天然气等都有相当高的灵敏度,并且有较高的重复性和使用寿命。选择纳米级的材料可以大幅度提高  $\text{SnO}_2$  气敏陶瓷传感器的气敏性能。今后的目标是研究低温或常温下工作的气敏传感器,此外  $\text{SnO}_2$  气敏传感器在如何消除环境气氛对湿度的影响方面还没有很好的解决。 $\text{ZrO}_2$  氧敏传感器在汽车方面



的应用近年来取得了很多进展,已开发出了检测空/燃比(A/F)=14.5~24 的叠层式传感器,但由于我国汽车目前常用掺有四乙铅的汽油作为燃料,它会使  $ZrO_2$  氧气敏传感器中毒失灵,因此开发使用  $TiO_2$  和  $CoO+MgO$  系陶瓷氧敏传感来检测汽车排气比用  $ZrO_2$  氧气敏传感器更适用。采用集成电路工艺把超微粒薄膜集成在硅衬底上,可制成对还原性气体灵敏度很高的气敏元件,是一种很有发展前途的新型半导体气敏传感器。随着人们对食品卫生的日益重视,气敏传感器用于酒类识别和肉类的鲜度鉴定得到了迅速发展。

功能陶瓷敏感器件的多功能化是今后发展的重要方向,如  $BaTiO_3$ - $BaSbO_3$  系材料可制成气-温-湿多功能敏感器件。此外功能陶瓷敏感器件薄膜化、厚膜化、叠层化和集成化的研究与开发也十分重要。

1.5 铁电薄膜

铁电薄膜是一类重要的功能性薄膜材料。根据 1997 年美、日等国专家调查的结果,非挥发性铁电随机存取存储器 (FRAM) 和动态随机存取存储器 (DRAM) 依然是目前推动铁电薄膜研究的巨大动力,微传感器、微驱动器和微型电动机将是今后几年的重要发展方向。虽然美国和日本在开发 FRAM、DRAM 和其它铁电薄膜上投入了大量的资金,但今后科研和开发的进展将取决于商业化应用的技术进步。目前许多铁电薄膜存储器商业化的技术障碍已被解决,包括高质量薄膜沉积方法(如 MOCVD)、界面层和电极材料以及在半导体上的集成化。自 20 世纪 90 年代初第一条 256kb 的 FRAM 商业生产线问世以来,现已能生产 1Mb、存储时间为 60ns 的这类存储器,据预测,未来几年总产值将达到数十亿美元。

PZT 基铁电薄膜是研究得最多的铁电薄膜材料,并已在 FRAM、热释电探测器以及其它相关器件中获得应用。但是 PZT 基薄膜存在严重的疲劳特性,尺寸效应也很明显。最近有报道,制作出了可经历  $10^{13}$  次循环的 PZT 薄膜,这可以满足大多数存储器件的要求。近年来具有含铋层状钙钛矿结构的  $SrBi_2Ta_2O_9$ (即 Y1)受到人们的广泛关注,已成为许多

集成铁电薄膜器件的首选材料<sup>[4]</sup>,因为它耐疲劳特性好、漏电流小、尺寸效应不明显且无铅公害。然而,SBT 需要较高的沉积温度(大于 720℃),这给高容量存储器件的集成化带来了困难,也增加了制作成本。未来几年的开发工作将决定何种铁电薄膜(PZT 或 SBT)可以成功地应用到商业化的存储器件中。此外,为了获得足够大的压电应变,相对较厚的 PZT 薄膜的制作也将是一个重要的方向。

尽管铁电薄膜的制备、表征和特性研究,集成铁电学和铁电薄膜物理学研究,铁电薄膜器件的设计、制作以及商品化已取得了重要进展,但仍有许多基本问题有待进一步深入研究,包括电极材料和多层电极结构,异质结的制备以及异质结的界面,电畴与电畴运动,缺陷与成分偏析等,这些问题直接关系到铁电薄膜器件的疲劳特性和工艺兼容性以及铁电薄膜的相变性质、临界厚度、击穿电场、开关速度和大面积均匀薄膜的制备技术等<sup>[5]</sup>。

1.6 智能材料

把功能陶瓷引入智能化阶段,是功能陶瓷发展的前沿技术,是陶瓷叠层化技术、复合技术、集成化技术以及自动化技术和微电子技术发展的结果。智能材料因其诱人的应用前景成为今后新材料发展的热点之一。

目前集传感、执行、处理、传输和控制等功能于一体的智能材料还鲜有报道。现在着手研究的是采用陶瓷复合和集成技术将已具有某些智能化属性的功能材料、驱动器和反馈系统等结合起来组成的智能材料系统或结构。在构筑智能材料系统中,压电材料是最重要、最有前途的材料之一。压电材料具有机、电、声、光、热、磁等多种功能及其耦合效应,可用作压力、温度、光等多种传感器。压电驱动器具有位移控制精度高、响应快、推动力大、驱动功率低和工作频率宽等优点。而且压电陶瓷很容易嵌入到一些结构中去;压电聚合物/陶瓷可以制成厚膜或薄膜且与许多表面结合在一起。因此常用压电智能材料系统来实现结构减振、有源消声和结构破坏控制等,在汽车、机械、建筑、航天和国防等领域都有广泛的应用前景。

一些实用化和正在研究的压电类智能材料和系统有:高级轿车减震装置和智能雨刷,水声系统

中消除或减少反射损耗的复合换能器,卫星和太空站智能减振天线,以及录像磁头自动定位器等<sup>[6]</sup>。用于潜艇吸声的智能蒙皮、机器人智能皮肤也正在研究之中。

当前赋予材料智能化的研究才刚刚开始,主要工作还集中在提出具有明确应用目标的实验思想、进行理论分析和模拟计算以及完成原理试验和装置等比较基础的方面。要使智能材料和系统向实用化和更高阶段发展,在未来的研究与发展过程中,下面几个方面值得注意:(1)采用多功能复合的方法可以增强智能材料和结构的灵敏性和选择性等功能。(2)非线性材料比线性材料具有更宽的响应范围,它能连续地调节一个或几个性能参数来响应环境的变化,从而使材料的智能水平向更高程度发展。(3)通过研究掌握一些生物所具有的特异功能并设法把研究成果用于智能材料的设计,会有更大的成功机会。如日本东北大学金属材料研究所正在通过研究牙齿的绝妙结构,用来设计防止噪音的列车新干线等。(4)必须尽可能把传感器、驱动器和反馈回路集成起来,如采用硅平面集成技术和微细加工技术等,做到小巧、轻便。微传感器和微控制回路一直是有关智能材料会议和招标书的重要内容之一。

2 我院的研究现状与发展建议

我院的功能陶瓷研究在国内具有明显的特色和一定的优势。上海硅酸盐研究所和清华大学联合主持了科技部“973”项目“信息功能陶瓷的若干基础问题研究”。中国科学院对弛豫铁电单晶研究方面的最新进展及其应用前景非常关注,支持了声学研究所和上海硅酸盐研究所共同承担的知识创新工程方向性项目“新型弛豫铁电单晶声呐换能器研究”。我院科研人员在功能陶瓷领域已取得了一系列重要的进展。

上海硅酸盐研究所在国际上率先用 Bridgman 方法直接从熔体中生长出了高质量的 PMN-PT 单晶,目前尺寸已经达到了 50×80mm,处于国际领先水平;AlN 基板材料的热导率已高达 228 W/m·k,基板尺寸为 50×50mm<sup>2</sup>,并实现了原料的低成本化;研制出了居里温度达到 914℃的 Bi<sub>3</sub>NbTiO<sub>9</sub> 铋层状

结构压电陶瓷,在高温加速度计和高温流量计上具有重要的应用前景。有多种压电陶瓷、铁电相变陶瓷、热释电陶瓷和 PLZT 透明陶瓷在国防建设中发挥着重要的作用。

低温烧结是我院在微波介质陶瓷研究方面的一大特色,上海硅酸盐所通过探索具有低烧结温度的材料体系,掺杂改性和粉体活化,已将多种微波介质材料的烧结温度降低了 100—200℃。

上海技术物理研究所在铁电薄膜非致冷红外焦平面研究方面承担了多项国家和上海市自然科学基金重点项目,近年来在 *Appl. Phys. Lett.*, *J. Appl. Lett.*, *J. Appl. Phys. Lett.*, *J. Am. Ceram. Soc.* 等刊物上连续发表了 20 多篇论文,部分工作得到了国内外的高度评价。

声学研究所在压电复合材料研究及换能器制作方面居国内领先地位。最近,党长久等人将并联 2-2 切割后按 45°方向拼接制成了面切变型压电复合材料及其换能器,另外他们将具有厚度模式振动的 1-3 型和具有扭转模式振动的 2-2 型拼接在一起,构成了一种新型的混合模式的压电复合材料,由这种复合材料制作的换能器能同时发射和接收纵波和横波。

新疆理化技术研究所自主开发的高温、低温和常温高精度负温度系数(NTC)热敏电阻器在所控股的公司已形成年产上千万的产值,也为我国航天、国防等事业做出了突出贡献。自主开发的多层片式压敏电阻器与成都 715 厂合作在国内率先实现了系列压敏电阻器的片式化。

虽然我院在功能陶瓷研究的某些方面做出了国际领先或先进水平的成果,但我们应清醒地认识到,从整体上看,我们与先进国家相比仍有较大的差距,同时在国内还面临着许多大学、研究机构 and 企业的激烈竞争,形势不容乐观。为此,我院在发展功能陶瓷研究时,首先要:

(1)发挥优势,突出重点。功能陶瓷无论是材料种类还是应用范围,覆盖面都非常广,我们不可能面面俱到,必须坚持“有所为,有所不为”的原则。我院在铁电压电陶瓷、电致伸缩陶瓷、热释电陶瓷、透明陶瓷、电解质陶瓷、超导陶瓷研究方面有自己的优势,在陶瓷基片、微波介质陶瓷、PTC 热敏陶瓷和

化学功能陶瓷方面也有自己的特色,我们必须在现有优势的基础上,集中力量,将国际研究前沿和国家重大需求有效地结合起来,保持我院在这些领域的国内领先地位。

(2)面向需求,加强部署。对于国家需求而我们又相对落后的关键技术,应尽早有计划地部署。如微波介质陶瓷和铁电薄膜是当前功能陶瓷领域研究和开发的两个重要方向,它们分别与信息技术和计算机技术密切相关,近期应支持院内基础较好的单位开展相关的研究,以期有所突破。

(3)建立完整的研究开发体系,发挥团队作用。功能陶瓷研究往往具有明确的应用前景和目标产品,因此应建立起从应用基础研究,到关键技术集成和产品开发的完整研发体系,保证研究、开发和

应用的连续性。功能陶瓷研究的切入点很多,容易导致研究小组小而分散的局面,应加强集合,密切协作,充分发挥有效资源的效率,才能积极争取和承担国家的重大科技攻关项目,并圆满地完成这些任务。

主要参考文献

1 Tien L C, Chou C C, Tsai D S. J. Am . Ceram. Soc., 2000, 83(8):2 074-2 078.

2 Takenaka T, Okuda T. Ferroelectrics, 1997, 175-178.

3 Robert F S. Sciences, 1997, 275 :1 878.

4 殷之文. 电介质物理学. 北京: 科学出版社,2003.

5 Scott J F. Ferroelectrics Review, 1998, 1(1):1.

6 Trolier-Mckinstry S, Newnham R E. MRS Bulletin, 1993, 4: 27-33.

The Present Situation and Prospect of Functional Ceramics

Dong Xianlin

(Shanghai Institute of Ceramics, CAS, 200050 Shanghai)

The present situation and prospects of functional ceramics, including ceramic substrate materials, microwave dielectric ceramics, ferro/piezoelectric ceramics, sensitive ceramic materials, ferroelectric thin film and smart materials, are reviewed briefly. Some suggestions are given for the development of functional ceramics.

**Keywords** functional ceramics, substrate materials, microwave dielectric ceramics, ferro/piezoelectric ceramics, sensitive ceramic materials, ferroelectric thin film, smart materials

**董显林** 上海硅酸盐研究所所长助理,功能陶瓷工程研究中心主任,研究员,博士生导师。1965 年 10 月出生于江西省。1982 年毕业于湖南大学化学与化学工程系,1992 年获上海硅酸盐研究所工学博士学位。1996 年在日本筑波大学物理工学系开展合作研究。近年来,承担和参加了包括国家自然科学基金重大和重点项目,国家安全重大基础研究项目,“九五”和“十五”军工配套,“863”计划,中国科学院应用发展研究重点项目,上海市自然科学基金重点项目,上海市青年科技启明星计划等在内的 10 多项科研任务。在国内外发表学术论文 40 多篇。