

电子封装用陶瓷材料研究现状

王君从* 杨 婷 胡美玲

中国电子科技集团公司第五十四研究所, 河北 石家庄 050081

[摘要] 电子信息技术的迅猛发展使电子元器件在高度集成化、多功能化、小型化和低成本等方面有着更高的标准和要求。电子封装作为电子制造业中的关键一环, 封装材料则发挥着非常重要的作用。文中对电子封装材料中的陶瓷基封装材料的种类、性能特点和制备方法进行了详细概述, 论述了当前电子封装用陶瓷材料氧化铝基、氮化铝基、碳化硅基和氮化硅基陶瓷的研究现状, 介绍了陶瓷基封装材料的实际应用, 最后对陶瓷基封装材料存在的问题及在未来的发展与前景进行了展望。

[关键词] 电子封装材料; 陶瓷材料; 研究现状

DOI: 10.33142/ec.v4i10.4598

中图分类号: TG1;TN3

文献标识码: A

Research Status of Ceramic Materials for Electronic Packaging

WANG Juncong*, YANG Ting, HU Meiling

The 54th Research Institute of CECT, Shijiazhuang, Hebei, 050081, China

Abstract: With the rapid development of electronic information technology, electronic components have higher standards and requirements in high integration, multi-function, miniaturization and low cost. Electronic packaging as a key link in electronic manufacturing, packaging materials plays a very important role in it. This paper summarizes in detail the types, performance characteristics and preparation methods of ceramic based packaging materials in electronic packaging materials, discusses the current research status of ceramic materials for electronic packaging, such as alumina based, aluminum nitride based, silicon carbide based and silicon nitride based ceramics, and introduces the practical application of ceramic based packaging materials. Finally, the problems and future development of ceramic based packaging materials are prospected.

Keywords: electronic packaging materials; ceramic materials; preparation methods; performance characteristics

引言

在飞速发展的全球化电子信息时代, 移动通信、人工智能、区块链等电子信息产业已经发展成为当今世界最为活跃的重要产业之一^[1]。电子封装正是电子制造业中最为关键的一项核心技术^[2]。简单来说, 电子封装就是把构成电子器件的各个元件, 按照规定要求进行合理的布置、组装、键合、连接、与外部环境进行隔离并达到保护作用的工艺流程^[3]。现如今微电子技术快速发展, 对电子设备和元器件高集成密度、多功能化、高可靠性及低成本的要求也越来越高^[4]。因此, 作为电子封装基础的封装材料, 受到了学术界和工业界的广泛关注, 成为近年来研究人员的研究重点和热点问题。

电子封装材料是推动电子信息产业迅猛发展的关键因素之一, 是整个电子封装技术的基础, 能够对芯片的电气连接、防潮散热、机械支撑、应力缓和、物理保护等起到决定性作用^[5], 确保芯片及整个系统能在各种复杂多变的环境中正常稳定工作, 其性能将会直接影响电子元器件和系统的性能和质量^[6]。在金属、陶瓷、塑料等众多封装材料中, 陶瓷材料具有热导率相对较高、耐热耐腐蚀性能好、介电常数小、化学性能稳定和高绝缘性、高可靠性、结构致密、低成本等特点, 成为了电子封装中最常用的材料^[7], 具有广阔的应用与发展前景。

本文主要论述了目前电子封装用陶瓷材料的概况与研究现状, 以及实际应用和在今后的发展趋势。

1 电子封装用陶瓷材料概述

微电子封装产业中, 按照严格布置设计将电子系统中所含的所有元件组装在一起形成一个高质量的封装整体, 达到与外部环境进行信息交流的目的, 并满足机械支撑和环境保护、信号传输和尺寸过渡等多种功能需要^[8], 而封装材料就是此封装工艺技术中的重要支撑。那么成为一种性能优异、应用广泛的电子封装材料, 首先应该具有介电和导热性能优异、机械强度高、高频特性好、易于加工、成本低等特点^[9]。

电子封装材料的分类方式有多种, 从封装结构上看, 电子封装材料分为基板、布线、框架、介质材料和密封材料五种^[10], 按组成成分, 电子封装材料主要分为金属基封装材料、聚合物基封装材料和陶瓷基封装材料三大类, 其中金属基封装材料的导热性好、强度高, 但热膨胀系数通常不匹配, 并且生产成本低, 一般应用于航空航天和军工的电子

封装；聚合物基封装材料重量轻、易加工^[11]，但可靠性差，在恶劣环境中难以适用；与其它两类材料相比，陶瓷基封装材料具有较低的介电常数和热膨胀系数，导热性能优异，机械强度高、绝缘性好、可靠性高，可实现电子系统中复杂元件一体化封装^[12]。电子封装材料不仅应用于与人们生活息息相关的电子通信、医疗机械、照明机械、汽车电子等领域，且在具有重要地位的航天、军工等领域都有着广阔的应用和发展前景。

1.1 陶瓷基封装材料种类

现如今，已经投入使用的电子封装陶瓷材料主要有 Al_2O_3 、 AlN 、 SiC 、 BeO 和 Si_3N_4 等，它们的主要性能如表 1 所示。其中碳化硅 (SiC) 的介电常数很高，不利于芯片间信号传播，传播时间延长，不适用于高集成密度封装；氧化铍 (BeO) 价格昂贵且有毒，其毒性限制了在工业上的广泛应用^[13]；氮化铝 (AlN) 具有硬度高、化学惰性大、导热系数高、热膨胀系数低、介电常数较低等优点，且与 BeO 相比， AlN 陶瓷无毒，是一种理想的电子封装材料^[14]。

氧化铝 (Al_2O_3) 相对其它陶瓷材料具有高导热性、高机械强度和良好的电气性能^[15]、化学稳定性好，与金属附着性良好，并且价格低廉产量大，由于其较为优异的综合性能，被广泛应用于电子元件的封装工艺中，如封装基板和集成电路板等，是目前电子行业中应用最广的陶瓷材料。

但是，由于氧化铝 (Al_2O_3) 的烧结温度相对较高 (约 1500°C)，在烧结过程中，容易消耗较多的能量从而提高成本，因此，在实际实验和应用生产中通常通过引入玻璃相或其它烧结助剂等，以便能够在较低温度下与导体材料 (如 Ag 熔点为 961.93°C 和 Cu 熔点为 1083.4°C) 实现共烧，因此，这种陶瓷就称为低温共烧陶瓷 (LTCC)。对应来说，高温共烧陶瓷 (HTCC) 是指在高温炉 (通常烧结温度为 1600°C 左右) 中高温烧结而成的陶瓷。所以按照烧结温度的高低，陶瓷封装材料又可分为高温共烧陶瓷 (HTCC) 和低温共烧陶瓷 (LTCC) 两种。高温共烧陶瓷 (HTCC) 和低温共烧陶瓷 (LTCC) 均属于多层陶瓷的两大类，多层陶瓷一般是指在电子封装产业中所用到的陶瓷材料与陶瓷制品。

表 1 电子封装陶瓷材料基本性能

Tab. 1 Basic properties of electronic packaging ceramic materials

Properties	Al_2O_3 ^[7]	AlN ^[16]	SiC ^[17]	BeO ^[18]	Si_3N_4 ^[19]
Thermal conductivity /W/(m·K)	20~30	320	490	250	177
CHYPERLINK "javascript:;":coefficient of thermal expansion/ $\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$	7~8	4	3.7	7.5	3.2
PHYPERLINK "javascript:;":permittivity	10	8	40	6.7	9.4
EHYPERLINK "javascript:;":lasticity modulus/GPa	300	310	450	350	320
BHYPERLINK "javascript:;":ending strength/MPa	300~400	300~400	350~600	170~270	920

1.2 陶瓷基封装材料制备工艺

目前，陶瓷基封装材料粉体的制备方法主要有固相法、液相法、气相法三种^[20]，其中固相法虽工艺简单，但极易引入杂质，而气相法工艺复杂，成本高，因此在研究和实际生产应用中常用的制备方法是以化学反应为基础的高温熔融法和溶胶-凝胶法，高温熔融法是将目标陶瓷材料所用的各种氧化物按照预定比例混合，在高温炉中 (一般高于 1500°C) 发生液相反应，并经过水淬、球磨，最终获得所需陶瓷粉料^[21]；溶胶-凝胶法是将原料分散在溶剂中，加入催化剂、稳定剂等在水浴锅中混合反应一定时间形成溶胶，将溶胶经过干燥陈化后预烧形成玻璃体，通过研磨制得玻璃陶瓷粉末^[22]。用化学法制得陶瓷材料颗粒的表面活性高，纯度高，能够进行致密化烧结。

此外，对于电子封装陶瓷中的高温共烧陶瓷 (HTCC) 和低温共烧陶瓷 (LTCC) 在制备方法上的主要差别在于烧结温度的高低，LTCC 是通过在浆料中加入了一定量玻璃粉来降低烧结温度制备而成的，在陶瓷材料中引入玻璃相，实现低于 950°C 的烧结^[23]，玻璃粉一般占整个粉体质量的 40%~60%，同时使用导电性良好的 Cu 、 Ag 和 Au 等金属实现共烧，达到降低成本、提高性能的目的。而 HTCC 工艺就是在高温炉中高温烧结得到的陶瓷基板材料。电子封装用陶瓷材料在成分和制备工艺方面在不断的研究与改进中，最终目的是制备出综合性能优异的陶瓷基材料，满足当今飞速发展的电子功率器件的需要。

2 陶瓷基电子封装材料的研究现状

2.1 氧化铝 (Al_2O_3)

电子封装首先要求所用材料的力学性能、导热性能和介电性能优异，在过去的几十年里，不同种类的陶瓷材料被科研人员作为电子封装的候选材料进行了大量的研究与探讨^[24]。氧化铝 (Al_2O_3) 陶瓷以其高导热性、高机械强度和良好的电气特性，被广泛应用于制造电子设备和元器件中，如布线基板和集成电路板等^[25]。

伍海东等^[26]采用无压烧结技术,以CaO-MgO-SiO₂作为烧结助剂,在1450℃、1500℃、1550℃、1600℃的四种不同温度下烧结96Al₂O₃陶瓷,并对烧结后样品的密度、力学性能、热导率和微观结构进行了分析讨论,图1为不同烧结温度下Al₂O₃的断面微观形貌,由图可以明显看出,随着烧结温度的升高,气孔明显减少,致密度增大。研究表明,在1600℃温度下烧结后的Al₂O₃样品具有较好的导热和力学性能,热导率为24.9W/(m·K),抗弯强度为(362.9±26.9)MPa。夏清等^[27]通过研究不同烧结助剂对95Al₂O₃陶瓷性能的影响,得出在添加5wt%的MgO-CaO-SiO₂和1wt%的TiO₂时在1520℃和常压下可以达到致密化烧结,得到性能优异的Al₂O₃陶瓷。YANG等^[28]在950~975℃的较低的烧结温度下,制备的掺杂5wt% 4CuO-TiO₂-2Nb₂O₅烧结助剂的致密氧化铝陶瓷具有良好综合性能,如表2所示,是非常有前景的用于电子封装的候选材料。

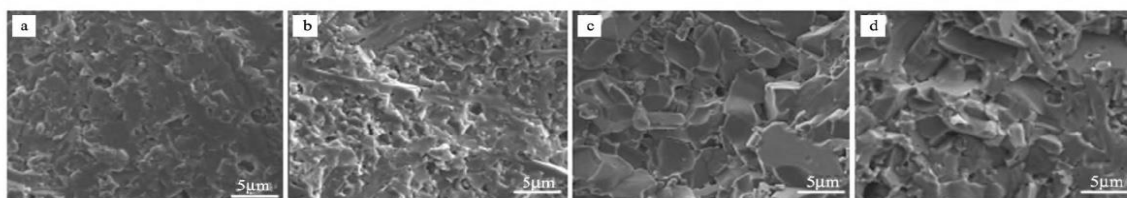


图1 不同烧结温度下所得Al₂O₃的SEM图^[26]

Fig.1 SEM images of Al₂O₃ samples sintered at different temperature^[26]

表2 掺杂5wt% CTN的氧化铝在975℃烧结2h后的综合性能^[28]

Tab.2 Combination property of 5% CTN doped alumina sintered at 975° C for 2h^[28]

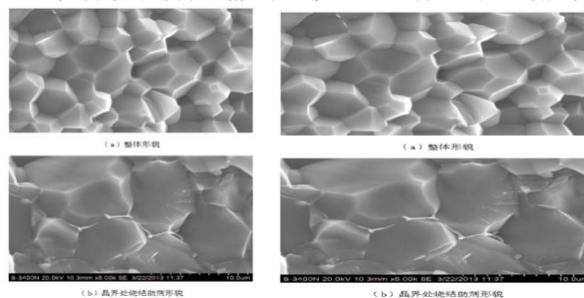
Density (g/cm ³)	Shrinkage (%)	ε (-)	Q×f value (GHz)	Thermal conductivity (W/(m·K))	CTE (×10 ⁻⁶ /K)	Bending strength (MPa)	Breakdown strength (KV/mm)	τ _f (ppm/K)
3.92	20.8	12.7	7400	18.4	7.21	320	13.70	-63

此外,WANG等^[29]通过固相合成反应合成了以La₂O₃-CaO-B₂O₃-SiO₂(LCBS)为添加剂的Al₂O₃基复合材料,是一种新型低温共烧陶瓷材料,通过改变复合材料中SiO₂的含量分析讨论了该材料的热学性能、力学性能、微波介电性能及内部机理。40wt%含有15wt% SiO₂的LCBS在850℃下与60wt% Al₂O₃烧结的复合材料综合性能优异,介电常数6.87,介电损耗低至为2.2×10⁻³,抗弯强度为241MPa,并且该复合材料与Ag电极表现出良好的化学相容性,在电子封装产业中具有广阔的应用前景。Chen等^[30]应用LTCC技术,制备了Li-Al-B-Si-O(LABS)玻璃和β-Al₂O₃基的复合材料,明显降低材料的残余应力,提高了集成的可靠性。

2.2 氮化铝(AlN)

氮化铝(AlN)陶瓷材料具有介电常数和介电损耗低、热导率高的性能特点,其中氮化铝高温共烧陶瓷(AlN HTCC)基板因具有比较低的介电常数和热膨胀系数,以及高的热导率,是首选的电子封装材料,并且可以在内部进行预制电路^[31]。

姚晓明等^[32]以La-Li-Ca三元系为烧结助剂,在经过模压成型和1750~1900℃的不同温度的无压烧结下,制得了致密度高、介电常数和介电损耗二者均比较低的AlN陶瓷,图2可以明显看出在1850℃下烧结并保温5h后,所得到的样品致密高、晶粒尺寸均匀。并且经探究分析表明提高烧结温度和延长保温时间均能够降低AlN陶瓷相对介电常数。



(a) 整体形貌 (b) 晶界处烧结助剂形貌

图2 1850℃烧结保温5h后AlN SEM图^[32]

Fig.2 SEM images of AlN samples sintered at 1850℃ for 5h

HUANG 等^[33]在 1850℃ 下以 8wt% 的 Y_2O_3 、 $Y_3Al_5O_{12}$ (YAG)、 $YAlO_3$ (YAP)、 $Y_4Al_2O_9$ (YAM) 为烧结助剂, 采用带铸无压烧结法制备 AlN 陶瓷基板, 探究分析了不同烧结助剂对烧结 AlN 陶瓷的显微组织形貌、热导率和弯曲强度的影响。烧结后的 AlN 陶瓷由 AlN 晶粒组成, 铝酸钇作为二次相分布在 AlN 晶粒的三相点处, 随着 Y_2O_3/Al_2O_3 比例的降低, AlN 陶瓷的导热系数和弯曲强度均降低, 由此可见, 烧结助剂的种类和含量对陶瓷材料的性能会有一定的影响。YUAN 等^[34]采用常压烧结工艺制备了不同玻璃/氮化铝配比的 $CaO-BaO-Al_2O_3-B_2O_3-SiO_2/AlN$ 新型的玻璃/陶瓷复合材料, 并对试样的体积密度、表观孔隙率、显微组织和介电性能随 AlN 含量的变化进行了表征和分析, 当 AlN 含量为 40wt% 时, 复合材料的性能较为优异, 介电常数为 6.3, 介电损耗为 0.0049, 具有良好的应用前景。

FANG 等^[35]以 $Bi_2O_3-ZnO-B_2O_3-SiO_2$ (BBSZ) 玻璃为玻璃相, Al_2O_3/AlN 为双相陶瓷相。采用铸带和固相烧结相结合的方法制备了高导热陶瓷低温共烧材料, 通过研究样品的晶体相组成、显微组织、导热系数、热膨胀和介电性能发现, 在 BBSZ/ Al_2O_3/AlN 材料中, 形成了纳米针状的铝尖晶石, AlN 含量为 20wt% 时, 热导率最高, 并且具有良好的介电性能, 可用于 5G 电子通信等实际应用。

2.3 碳化硅 (SiC)

碳化硅 (SiC) 作为封装材料, 具有较高的热导率、较低的热膨胀系数, 由于其介电常数很高, 能达到 40, 因此只适用于集成度较低的封装。

TENG 等^[36]采用粉末冶金方法制备了 Al-50%SiC 复合材料, 研究了 SiC 颗粒尺寸对复合材料性能的影响, 分析表明 SiC 颗粒均匀分布在铝基体中, 热膨胀系数和热导率随着颗粒尺寸的增大而提高, 抗弯强度减小。LI 等^[37]采用气压浸渗法制备了具有三维互穿网络结构的碳化硅 (SiC) 增强铝基复合材料 (3D-SiC/Al), 并对其热物理性能进行了研究, 发现在 SiC 体积分数相同的情况下, 3D-SiC/Al 复合材料比 SiCp/Al 复合材料更适合电子封装应用。

LU 等^[38]以 Y_2O_3 为烧结助剂, 在 2000℃ 惰性气氛下进行无压烧结, 制备了高密度的 AlN-SiC 复合陶瓷。分析探讨了 SiC 颗粒尺寸对 AlN-SiC 复合陶瓷密度、导热系数、电阻率和介电性能的影响。随着 SiC 粒径的增大, AlN-SiC 复合陶瓷的密度减小, 电阻率增大, 介电常数减小, 介电损耗增大。由图 3 的 XRD 分析得出, AlN 和 SiC 之间没有形成固溶体, 并且显微组织均匀。采用 2 μm SiC 粉末制备的 AlN-SiC 复合陶瓷性能最佳, 室温下热导率最高, 介电常数较低, 为 14~17, 烧结密度和电阻率均较高, 是一种非常有前景的电子封装陶瓷材料。

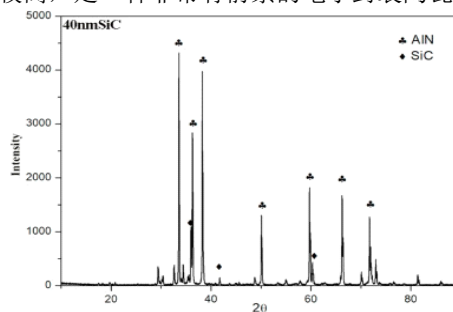


图3 用 40 nm SiC 制备的 AlN-SiC 复合陶瓷 XRD 谱图

Fig.3 XRD pattern for AlN-SiC composite ceramic with 40 nm SiC

2.4 氮化硅 (Si_3N_4)

氮化硅 (Si_3N_4) 由于其高强高硬度, 热膨胀系数小, 热导率高的特点, 常用来制备高强高导热基板材料^[39]。由表 1 可知, Si_3N_4 的导热系数比 AlN 低, 但远高于 Al_2O_3 , 并且弯曲强度也远高于其它陶瓷材料, 机械性能好, 工艺成本较低, 因此, Si_3N_4 陶瓷作为电子封装用候选材料具有广阔的发展前景和应用市场。

LIU 等^[40]选择了 5wt% 不同种类的稀土氧化物和 2wt% MgO 作为添加剂, 系统探究了稀土氧化物的种类对 Si_3N_4 陶瓷微观结构、相组成、导热性能和介电性能的影响。分析表明, 掺杂离子半径较小的稀土氧化物 (如 Yb_2O_3 、 Lu_2O_3 、 Er_2O_3 和 Dy_2O_3), 氮化硅样品具有较高的热导率, 如图 4 所示。掺杂 Eu_2O_3 的氮化硅陶瓷的导热系数和介电常数最低, 而掺杂 Nd_2O_3 等离子半径较大的稀土氧化物样品的介电常数较大, 但探究发现稀土氧化物的种类对于介电损耗并没有太大的影响。TONG 等^[41]对在 1800℃ 下热压法制备氮化硅陶瓷样品的力学、热学和介电性能进行了系统的研究分析, 当 Y_2O_3 质量百分比为 5wt% 时, Si_3N_4 陶瓷样品具有最佳的综合性能, 介电损耗小于 0.01, 介电常数约为 8.7, 具有最高的热导率和断裂韧性。

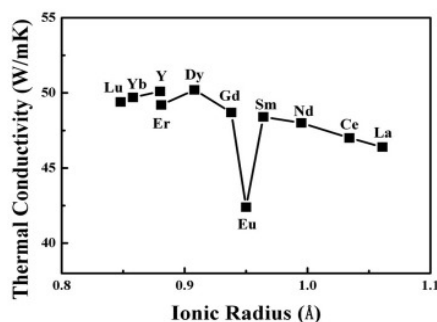


图4 掺杂不同稀土氧化物的 Si_3N_4 陶瓷导热系数与稀土氧化物离子半径的关系^[40]

Fig. 4 The relationship between the thermal conductivity of as-sintered Si_3N_4 doped with different rare earth oxides and the rare earth oxide ionic radius^[40]

LUO 等^[42]采用两步烧结工艺制备了 $\text{AlN}/\text{MAS}/\text{Si}_3\text{N}_4$ 三元复合材料, 对其进行了组织分析、成分研究和性能表征, $\text{AlN}/\text{MAS}/\text{Si}_3\text{N}_4$ 三元复合材料可以在 1650°C 的氮气气氛中致密化烧结, 而原位生长的棒状 $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ 晶粒有利于提高材料的热性能、力学性能和介电性能, 具有较高的热导率, 相对介电常数为 6.2, 抗弯强度为 325MPa , 是综合性能优异的三元复合材料, 有望作为高性能电子封装材料广泛应用。

2.5 其它陶瓷基封装材料

除以上电子封装用陶瓷材料以外, 还有氧化铍 (BeO)、氮化硼 (BN) 以及其它陶瓷基复合材料应用于电子封装领域。 BeO 具有较高的热导率, 适用于大功率应用^[43], 但是 BeO 是一种有毒性的物质, 在科学研究和工业生产时必须采取防护措施, 并且制备过程所需温度高, 操作复杂, 成本高, 对环境也造成很大的污染^[44], 极大的限制了其在微电子器件产业中的广泛应用。

Zhu 等^[45]通过固相反应制备了 $\text{MgTiO}_3/\text{CaO-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ (CBS) 陶瓷复合材料, 对合成的陶瓷复合材料的烧结性能、晶体组成、显微结构、介电性能和力学性能进行了测定, MgTiO_3 陶瓷作为高性能介质, 显著提高了复合材料的介电性能和力学性能, 并且研究表明, 含有 40wt% MgTiO_3 在 830°C 低温下就可烧结, 是一种非常有前景的电子封装材料。

此外, FANG 等^[46]采用真空辅助法将氮化硼泡沫 (BNF)、氮化硼纳米片 (BNNS) 和聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 混合, 在化学气相沉积法合成的三维氮化硼纳米片 (BNNS) 中制备了一系列新型柔性聚合物复合材料, 并对其微观结构、热性能、力学性能和介电性能进行了分析, 具有高导热系数和耐热性指数, 介电常数相对较低, 由于其优异的综合性能, BNNS/BNF/PDMS 复合材料在电子封装领域具有广阔的应用前景。

综上所述, 近年来, 学术和工业界科研人员对电子封装用陶瓷材料进行了大量的研究与探讨, 在传统陶瓷材料的基础上, 研发出各种满足当前电子系统和未来发展所需的综合性能优异的电子封装材料, 成为电子封装产业中具有非常广泛的应用和发展前景的新型材料。

3 电子封装用陶瓷材料的应用

电子封装用陶瓷材料因其良好的导热、介电、力学等综合性能, 广泛应用于电子通讯、人工智能、航空航天、军工等领域, 而随着功率器件和设备系统的飞速发展, 应用领域更加广泛, 需求量也在不断扩大, 在质量要求上也更为复杂严苛。根据陶瓷材料各自的性能与特点, 应用领域也各有差别。

氧化铝 (Al_2O_3) 陶瓷具有良好的机械性能, 价格低廉, 制备工艺成熟, 但其导热系数相对较低, 烧结温度较高, 约为 1500°C , 只允许与钨、钼等高熔点导体共烧, 电气性能较差, 因此难以在高功率设备进行实际应用^[47]。

氮化铝 (AlN) 陶瓷是一种导热系数高的无毒材料, 在室温下其固有的导热系数能达到 $319\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ^[48], 因此, AlN 被认为是一种非常有前景的电子封装材料, 可用于大功率微波器件^[49], 杨振涛等^[50]采用陶瓷焊球阵列封装技术制备了一种应用于 12GHz 的 AlN 多层陶瓷外壳, 可广泛应用高频高速信号的一体化封装领域。 AlN 陶瓷材料凭借其与其与半导体材料相兼容的热膨胀系数和优异的散热性能, 成为了封装陶瓷材料的关注热点。

碳化硅 (SiC) 陶瓷具有很强的化学惰性、优异的热学、光学、机械和电子性能, 由于其固有载流子不足, 在大功率及高温高压的恶劣条件下热导率很高, 因此常应用于固态照明和电力电子领域^[51]。

氮化硅 (Si_3N_4) 陶瓷因其优异的机械性能、良好的抗热震和化学腐蚀性能以及突出的绝缘性能而成为非常受欢迎的电子封装材料^[52], 在高性能电子封装领域有很大的发展前景。

此外, 电子封装用陶瓷材料中的低温共烧陶瓷 (LTCC) 材料由于其优异的介电、热学、力学性能和高可靠性、易于集成、设计多样等综合性能, 受到越来越多的关注与研究, 现已广泛应用于多层微电子器件中, 成为 MCM 多芯片微组装工艺的首选材料^[63], 被广泛应用于航天器等电子设备中。

4 结语与展望

近几年来, 电子陶瓷封装材料的发展呈现多样化的趋势, 传统的陶瓷材料并不能满足现如今电子封装的要求。

因此, 根据陶瓷基封装材料的研究与应用现状提出以下展望:

(1) 电子设备和元器件工作频率的不断提高和高度集成化需求, 信号传输延迟这一问题亟待解决, 因此, 科研人员通过提高封装材料的热导率, 并降低介电常数来减小信号延迟时间, 满足电子器件在高频下的高性能广泛应用。

(2) 电子元器件性能的提高和应用环境的复杂多变对电子封装材料散热性能的要求也越来越高, 致密化烧结就有利于增大热导率, 提高所用材料本身的散热性能。

(3) 微型化、集成化、便携化电子产品需求的增大, 需要不断提高电路的组装密度和系统稳定性, 并减小封装尺寸, 因此在封装过程中, 需要研制具有更低的介电常数、高导热、高绝缘和高频化的电子封装材料来满足当前信息技术领域的发展需求。

由此可见, 在传统电子封装陶瓷材料的基础上, 研发具有高性能、操作简便、成本低、能广泛应用于工业生产、综合性能优异的新型电子封装用陶瓷材料具有非常重要的现实意义, 为发展迅猛的电子信息产业奠定坚实的材料基础。

【参考文献】

- [1]张翼. 微电子封装的发展历史和新动态[J]. 机械工程与自动化, 2016(1): 216-221.
- [2]张力元. 微电子封装技术的发展趋势[J]. 百家论坛, 2012(4): 42-46.
- [3]田民波, 梁形翔, 何卫. 电子封装技术和封装材料[J]. 半导体情报, 1995, 32(4): 42-61.
- [4]Imanaka Y. Multilayered Low Temperature Cofired Ceramics (LTCC) Technology [M]. Boston: Springer, 2005.
- [5]邓安强, 樊静波, 谭占秋, 等. 金刚石/铜复合材料在电子封装材料领域的研究进展[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2010, 30(5): 56-61.
- [6]曾小亮. 电子封装基板材料研究进展及发展趋势[J]. 集成技术, 2014, 3(6): 76-83.
- [7]程浩, 陈明祥, 罗小兵, 等. 电子封装陶瓷基板[J]. 现代技术陶瓷, 2019, 40(4): 265-292.
- [8]Andy P, Suresh K S. Universal Fatigue Life Prediction Equation for Ceramic Ball Grid Array (CBGA) Packages[J]. Microelectronics Reliability, 2007, 47(12): 2260-2274.
- [9]汤涛, 张旭, 许仲梓. 电子封装材料的研究现状及趋势[J]. 南京工业大学学报: 自然科学版, 2010, 32(4): 105-110.
- [10]张文毓. 电子封装材料的研究与应用[J]. 上海电气技术, 2017, 10(2): 72-77.
- [11]Wan Y J, Li G, Yao Y M, et al. Recent advances in polymer-based electronic packaging materials[J]. Composites Communications, 2020, 19(2020): 154-167.
- [12]方润. 电子封装的发展[J]. 科协论坛(下半月), 2012(2): 84-86.
- [13]Kiikol V S, Vaispapur V Y. Thermal Conductivity and Prospects for Application of BeO Ceramic in Electronics[J]. Glass and Ceramics, 2015, 71(12): 387-391.
- [14]Wang L Z, Zhao W Q, Mei X S, et al. Improving quality and machining efficiency of hole during AlN trepanning with nanosecond pulse laser[J]. Ceramics International, 2020, 46(15): 24018-24028.
- [15]Li H Y, Xi X, Ma J, et al. Low-temperature sintering of coarse alumina powder compact with sufficient mechanical strength[J]. Ceramics International, 2017, 43(6): 5108-5114.
- [16]丁利文, 范桂芬, 李镜人, 等. AlN 陶瓷的性能及应用[J]. 现代技术陶瓷, 2016, 37(1): 22-33.
- [17]Zhou Y, Hirao K, Watari K, et al. Thermal conductivity of silicon carbide densified with rare-earth oxide additives[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2004, 24(2): 265-270.
- [18]张兆生, 卢振亚, 陈志武. 电子封装用陶瓷基片材料的研究进展[J]. 材料导报, 2008, 22(11): 16-20.
- [19]Zhou Y, Hyuga H, Kusano D, et al. Development of high-thermal-conductivity silicon nitride ceramics[J]. Journal of Asian Ceramic Societies, 2015, 3(3): 221-229.
- [20]刘兵, 彭超群, 王日初, 王小锋, 李婷婷, 王志勇. Al₂O₃陶瓷基片电子封装材料研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(8): 1893-1903.

- [21] 张晓辉, 郑欣. 低温共烧陶瓷材料的研究进展[J]. 微纳电子技术, 2019, 56(10): 797-805.
- [22] 郑琼娜, 王双喜, 欧阳雪琼, 尤晶, 黄国权. 低温共烧陶瓷材料及其制备工艺[J]. 中国陶瓷, 2010, 46(10): 7-11.
- [23] Arcaro S, Cesconeto F R, Raupp-Pereira F, et al. Synthesis and characterization of LZS/ α - Al_2O_3 glass-ceramic composites for applications in the LTCC technology[J]. Ceramics International, 2014, 40(4): 5269-5274.
- [24] Kuramoto N, Takada K. Applications of aluminum nitride (AlN) ceramics[J]. Key Engineering Materials, 2003, 247(2003): 467-472.
- [25] Shigeno K, Li M Y, Fujimori H. Development of novel temperature-stable Al_2O_3 - TiO_2 -based dielectric ceramics featuring superior thermal conductivity for LTCC applications[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2021, 41(1): 376-386.
- [26] 伍海东, 刘伟, 程利霞, 等. 烧结温度对 96 Al_2O_3 陶瓷力学性能及热导率的影响 [J]. 人工晶体学报, 2017, 46(9): 1864-1868.
- [27] 夏清, 严运, 严小艳, 等. 烧结助剂对 95 氧化铝瓷性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2014, 33(2): 266-270.
- [28] Yang Y, Ma M S, Zhang F Q, et al. Low-temperature sintering of Al_2O_3 ceramics doped with $4\text{CuO-TiO}_2-2\text{Nb}_2\text{O}_5$ composite oxide sintering aid[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2020, 40(15): 5504-5510.
- [29] Wang F, Lou Y H, Li Z J, et al. Improved flexural strength and dielectric loss in Al_2O_3 -based LTCC with La_2O_3 - $\text{CaO-B}_2\text{O}_3$ - SiO_2 glass[J]. Ceramics International, 2021, 42(7): 9955-9960.
- [30] Chen G Y, Liu Z F, Ma M S, et al. Composites of Li-Al-B-Si-O glass and β - Al_2O_3 for LTCC-silicon heterogeneous integration applications[J]. Ceramics International, 2018, 44(18): 141-144.
- [31] Zhang X L, Chen N, Wu J M, et al. Rapid fabrication of surface microstructures on AlN HTCC substrate by chemically assisted laser ablation[J]. Ceramics International, 2021, 47(19): 27598-27608.
- [32] 姚晓明, 张耀辉, 于云飞, 等. 氮化铝陶瓷材料的介电性能[J]. 安全与电磁兼容, 2017(2): 47-84.
- [33] Huang D, Tian Z B, Cui W, et al. Effects of Y2O3 and yttrium aluminates as sintering additives on the thermal conductivity of AlN ceramic substrates[J]. Ceramics International, 2018, 44(16): 20556-20559.
- [34] Yuan L N, Liu B, Shen N N, et al. Synthesis and properties of borosilicate/AlN composite for low temperature co-fired ceramics application[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2014, 593(13): 34-40.
- [35] Fang X Y, Lv Y Y, Zhang L, et al. Effect of AlN addition on phase formation in the LTCC with Al_2O_3 /AlN biphasic ceramics based on BBSZ glass[J]. Ceramics International, 2020, 46(10): 16895-16900.
- [36] Teng F, Yu K, Luo J, et al. Microstructures and properties of Al-50%SiC composites for electronic packaging applications[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2016, 26(10): 2647-2652.
- [37] Li S, Xiong D G, Liu M, et al. Thermophysical properties of SiC/Al composites with three dimensional interpenetrating network structure[J]. Ceramics International, 2014, 40(5): 7539-7544.
- [38] Lu Y P, Zang X R, Du B, et al. Investigation of the effect of the SiC particle size on the properties of the AlN-SiC composite ceramic[J]. Materials Chemistry and Physics, 2021, 261(74): 124222-124240.
- [39] 张伟儒, 高崇, 郑彧. 氮化硅: 未来陶瓷基片材料的发展趋势[J]. 新材料产业, 2016(11): 34-37.
- [40] Liu W, Tong W X, Lu X X, et al. Effects of different types of rare earth oxide additives on the properties of silicon nitride ceramic substrates[J]. Ceramics International, 2019, 45(9): 12436-12442.
- [41] Liu W, Tong W X, He R X, et al. Effect of the Y_2O_3 additive concentration on the properties of a silicon nitride ceramic substrate[J]. Ceramics International, 2016, 32(10): 1160-1179.
- [42] Luo Z W, Zhang J, Lin C W, et al. Synthesis and properties of AlN/MAS/ Si_3N_4 ternary glass-ceramic composites with in-situ grown rod-like β - Si_3N_4 crystals[J]. Ceramics International, 2018, 44(2): 1875-1880.
- [43] Aravindraj E, Ayyappan K, Kumar R. Performance analysis of rectangular MPA using different substrate materials for WLAN application[J]. ICTACT Journal on Communication Technology, 2017, 8(1): 1447-1452.
- [44] 陈寰贝, 庞学满, 胡进, 等. 航空航天用电子封装材料及其发展趋势[J]. 电子与封装, 2014, 14(5): 6-9.
- [45] Zhu X D, Kong F T, Ma X S. Sintering behavior and properties of $\text{MgTiO}_3/\text{CaO-B}_2\text{O}_3$ - SiO_2 ceramic composites for LTCC applications[J]. Ceramics International, 2019, 45(2): 1940-1945.
- [46] Fang H M, Bai S L. Thermal, mechanical and dielectric properties of flexible BN foam and BN nanosheets

reinforced polymer composites for electronic packaging application[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2017, 100(15): 71-80.

[47] Wang S X, Liu G S, OuYang X Q, et al. Fabrication of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{glass}/\text{Cf}$ composite substrate with high thermal conductivity[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2016, 25(2): 642-647.

[48] Slack G A. Nonmetallic crystals with high thermal conductivity[J]. Journal of Physics and Chemistry of Solids, 1973, 34(2): 321-335.

[49] Hu G L, Chen C Q, Ramesh K T, et al. Mechanisms of dynamic deformation and dynamic failure in aluminum nitride[J]. Acta Materialia, 2012, 60(8): 3480-3490.

[50] 杨振涛, 彭博, 刘林杰. 等. 一种应用于 12GHz 的 AlN 多层陶瓷外壳[J]. 半导体技术, 2021, 46(2): 158-168.

[51] Xu M, Girish Y R, Rakesh K P. Recent advances and challenges in silicon carbide (SiC) ceramic nanoarchitectures and their applications[J]. Materials Today Communications, 2021, 28(17): 102533-102560.

[52] Li Y S, Kim H N, Wu H B, et al. Microstructure and thermal conductivity of gas-pressure-sintered Si_3N_4 ceramic: the effects of Y_2O_3 additive content[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2020, 41(1): 274-283.

[53] 史晓飞, 吕家璘, 张晓明, 等. 低温共烧陶瓷 (LTCC) 技术研究及在航天领域的应用[J]. 宇航材料工艺, 2015(1): 89-91.

作者简介: 王君从 (1988-), 女, 工程师, 硕士, 研究方向: 集成电路测试。