

# 电子封装基板材料研究进展及发展趋势

曾小亮<sup>1</sup> 孙 蓉<sup>1</sup> 于淑会<sup>1</sup> 许建斌<sup>2</sup> 汪正平<sup>3</sup>

<sup>1</sup>(中国科学院深圳先进技术研究院先进材料中心 深圳 518055)

<sup>2</sup>(香港中文大学工程学院电子工程系 香港 999077)

<sup>3</sup>(香港中文大学 香港 999077)

**摘 要** 基板材料在电子封装中主要起到半导体芯片支撑、散热、保护、绝缘及与外电路互连的作用。随着电子封装技术向着高频高速、多功能、高性能、小体积和高可靠性方向发展,电子封装基板材料在新一代电子封装材料中发挥着越来越重要的作用。科学与工业界对电子封装基板材料提出了更高的要求,同时也促进了电子封装基板材料飞速发展。文章分别针对三大类基板材料:陶瓷基板、复合材料基板和有机基板的特点、发展现状及未来发展趋势进行了阐述。

**关键词** 电子封装; 基板材料; 陶瓷基板; 复合材料基板; 有机基板

**中图分类号** TB 332 文献标志码 A

## The Research Development and Trend of Substrates in Electronic Packages

ZENG Xiaoliang<sup>1</sup> SUN Rong<sup>1</sup> YU Shuhui<sup>1</sup> XU Jianbin<sup>2</sup> WONG Chingping<sup>3</sup>

<sup>1</sup>(Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China)

<sup>2</sup>(Department of Electronic Engineering, Faculty of Engineering, The Chinese University of Hong Kong, Hong Kong 999077, China)

<sup>3</sup>(The Chinese University of Hong Kong, Hong Kong 999077, China)

**Abstract** The main functions of substrates in electronic packaging include supporting, cooling, protection of semiconductor chips, as well as insulation and electronic interconnection with external chips. With the electronic packaging developing towards high speed, multi-functionalization, high performance, good stability and small dimension, substrates play more and more important role in the field of new generation electronics packaging. Scientists and engineers have higher requirement to substrate materials, which advances their brilliant progress. In this review, the characteristic, recent progress and future development of three kinds of substrates were summerized, including ceramic, composite and organic substrates.

**Keywords** electronic packaging; substrate materials; ceramic substrate; composite substrate; organic substrate

收稿日期: 2014-07-23

基金项目: 广东省引进创新科研团队计划(2011D052); 深圳市孔雀计划团队(KYPT20121228160843692); 三维高密度基板及高性能 CPU 封装技术研发与产业化, 国家 02 专项(2011ZX02709); 深圳市电子封装材料工程实验室(深发改【2012】372 号)

作者简介: 曾小亮, 博士研究生, 研究方向为高导热电子封装基板材料; 孙蓉(通讯作者), 博士, 研究员, 研究方向为新一代电子封装材料及其产业化, E-mail: rong.sun@siat.ac.cn; 于淑会, 博士, 副研究员, 研究方向为纳米复合功能材料、电子封装材料、埋入式电子器件与超级电容器; 许建斌, 博士, 教授, 研究方向为高性能光电材料; 汪正平, 美国工程院院士/中国工程院外籍院士, 研究方向为聚合物纳米复合材料与高密度电子封装材料。

## 1 引言

随着信息技术革命的到来, 集成电路产业在我国飞速发展, 已成为国家经济发展的主要驱动力之一。2014年6月, 我国颁布的《国家集成电路产业发展推进纲要》提到: 2013年, 中国集成电路进口和逆差总额分别为2313亿和1436亿美元, 与2500亿美元的石油进口额相当。在国家信息安全受到日益严峻挑战的情况下, 中国制造和中国需求的不断崛起, 集成电路的产业越来越受到国家的关注。在集成电路产业中, 基板材料是连接与支撑电子器件的重要材料。其性能的好坏决定了集成电路的性能、质量和制造水平。

经过30多年的发展, 我国在基板材料制备与技术方面, 都已取得巨大进展。然而我国先进电子产品制造企业与国外企业存在较明显的差距, 高端基板材料大多依赖进口。随着电子封装材料及技术的革新, 电子信息产业正面临产业升级和结构调整。新材料与新技术的研究与产业化, 将对我国电子工业的发展起到巨大的推动作用, 也是一个极好的发展契机。因此, 综述当前基板材料的研究现状及掌握其未来发展趋势对开发高性能基板材料具有重要的指导作用。

传统意义上, 基板材料主要分为陶瓷基板、金属基板和有机树脂基板。近年来, 柔性电子技术特别是可穿戴电子技术的兴起与迅速发展, 引起全世界的广泛关注。它的出现也引起了基板材料的重新分类。本文将基板材料分为: (1) 陶瓷基板; (2) 复合材料基板(即传统上的有机树脂基板, 该类基板材料主要以无机颗粒和纤维为增强材料、以有机树脂特别是热固性树脂为基体制备而成); (3) 有机基板(主要应用于柔性电子领域)。高密度系统级封装技术的发展对电子封装基板提出了更高更全面的要求, 致使传统基板材料已不能满足元器件及半导体芯片要求。因此, 研究和开发高性能基板材料引起了科学家和工业

界的广泛关注。本文分别对三大类基板材料, 即陶瓷基板、复合材料基板和有机基板的特点、发展现状及未来发展趋势进行阐述。

## 2 基板材料发展现状

### 2.1 陶瓷基板

陶瓷( $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{AlN}$ 、 $\text{SiC}$ 、 $\text{BN}$ )基板, 具有高化学稳定性、高耐腐蚀性、高热导率、低热膨胀系数、低介电常数和低介电损耗等特点。根据陶瓷基板的应用可将其分为两大类: 一类是高热基板, 包括:  $\text{AlN}$  基板、 $\text{SiC}$  基板和  $\text{BeO}$  基板等, 主要应用于 LED 领域。长期以来,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{BeO}$  陶瓷基板是大功率 LED 封装中两种主要基板材料。其中,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  基板热导率偏低, 热膨胀系数与芯片材料(如硅)不匹配, 越来越难以满足现代大功率 LED 对基板材料的要求。另一方面,  $\text{BeO}$  虽然具有优良的综合性能, 但存在生产成本较高和有剧毒等缺点。因此, 从性能、成本和环保等方面考虑, 这两种基板材料均不能作为今后大功率 LED 器件发展的最理想材料。

$\text{AlN}$  陶瓷具有高热导率、高强度、高电阻率、低密度、低介电常数、无毒以及低热膨胀系数等优异性能, 将逐步取代传统  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{BeO}$  陶瓷基板, 成为今后最具发展前途的一种陶瓷基板材料。由于  $\text{AlN}$  基板不具有电导性, 因此在用作大功率 LED 散热基板之前必须对其表面进行金属化和图形化处理。但  $\text{AlN}$  与金属是两类物理化学性质完全不同的材料, 在高温下  $\text{AlN}$  与金属的浸润性较差, 实现金属化难度较高。因此, 如何实现  $\text{AlN}$  基板表面金属化和图形化成为大功率 LED 散热基板发展的一个至关重要问题。为解决此问题, 齐维靖<sup>[1]</sup>采用真空蒸发镀膜和直流磁控溅射技术实现了  $\text{AlN}$  陶瓷基板的金属化, 并制得了 LED 封装用高散热的  $\text{AlN}$  散热基板。虽然采用此方法实现了  $\text{AlN}$  的金属化, 但

是存在真空蒸发和磁控溅射技术设备成本高, 工艺复杂等缺陷。因此, 采用化学方法实现 AlN 的金属化将是未来发展的必然趋势。

另一类是共烧多层陶瓷基板, 具有低介电常数, 适用于高速器件<sup>[2]</sup>。多层陶瓷基板材料分为高温共烧陶瓷 (HTCC) 和低温共烧陶瓷 (LTCC)。随着封装技术集成度越来越高, 封装器件的互连线尺寸和器件的体积越来越小, 信号损失和生产成本降到最低。因此基板材料要有符合封装要求的性能。低温共烧陶瓷基板以其可控的介电常数, 窄的布线宽度及与芯片匹配的热膨胀系数等特性得到了广泛的应用。华东理工大学夏冬<sup>[3]</sup>针对封装高膨胀材料时, 基板材料必须具备相匹配的高膨胀系数的问题, 采用微晶玻璃和玻璃/陶瓷复合材料的技术路线制备了高膨胀低温共烧陶瓷基板。随着封装器件的进一步小型化, 信号损失带来的问题将更加尖锐, 如何实现此类材料在高频下具有低介电常数 (小于 2.0) 将是未来科学家和工程师需要共同攻克的难题。我们应该看到, 陶瓷基板存在质脆、制备工艺复杂等问题, 复合材料基板和有机基板将取代陶瓷基板是未来大势所趋。目前, 陶瓷基板的市场占有率逐年减小。

## 2.2 复合材料基板

复合材料基板是利用有机树脂为粘合剂, 玻璃纤维和无机填料为增强材料, 采用热压成型工艺所制成。与陶瓷基板相比, 复合材料基板具有低介电常数、低密度、易机械加工、易大批量生产和成本低的优点。根据国际半导体制造设备与材料协会统计, 2010 年全球半导体封装材料市场达到 187.76 亿美元。其中有机树脂型复合材料基板的销售额达到了 76.74 亿美元, 占整个半导体封装材料销售额的 41.9%。随着消费类电子产品和移动产品的不断变轻变薄和智能化, 复合材料在整个基板材料领域将发挥越来越重要的作用, 同时对复合材料基板的性能提出了更高的要求, 归结为如下两个方面:

### 2.2.1 低热膨胀系数

电子元器件与基板材料热膨胀系数差异导致电子元器件内部产生热应力, 造成强度下降、耐热冲击差、容易老化开裂等各种缺陷。降低基板材料的热膨胀系数已成为提高电子元器件稳定性的重要手段, 国内外学者对此作了大量的研究。常用的方法是添加无机填料 (如  $\text{SiO}_2$ )。为获得更低的热膨胀系数, 研究者需要添加大量的无机填料。而过多的无机填料导致基板材料低的力学性能降低。如何在较少添加量的情况下实现低热膨胀系数成为当前研究的难点。

负热膨胀材料是近年来国内外研究者广泛关注的一类新型材料。在负热膨胀材料中, 钨酸锆 ( $\text{ZrW}_2\text{O}_8$ ) 由于具有负热膨胀效应温度范围宽和各向同性的特点而备受关注。采用负热膨胀材料为无机填料制备的聚合物基复合材料表现出更加优异的热膨胀性能。江苏大学程晓农课题组<sup>[4-6]</sup>对负热膨胀材料在电子封装材料领域的应用做了大量有意义的研究。如徐桂芳<sup>[5]</sup>采用固相化学法合成了高纯度、粒径在  $0.5\sim 1.0\ \mu\text{m}$  的  $\text{ZrW}_2\text{O}_8$  无机粒子, 其在  $20\sim 700^\circ\text{C}$  区间内, 平均热膨胀系数为  $-5.33\times 10^{-6}/\text{K}$ 。将负热膨胀材料与环氧树脂复合后, 复合材料热膨胀系数低至  $10\times 10^{-6}/\text{K}$ 。由于添加无机填料降低热膨胀系数的同时会降低基板的透光性, Jin 等<sup>[7]</sup>通过将玻璃纤维与有机硅树脂复合制备了高透明性 ( $<89\%$ )、低热膨胀系数 ( $<13\times 10^{-6}/\text{K}$ ) 和高热稳定性 ( $378^\circ\text{C}$ ) 的有机基板材料。虽然采用负热膨胀材料可以大幅度降低聚合物的热膨胀系数, 但是与硅热膨胀系数 ( $2.5\times 10^{-6}/\text{K}$ ) 相比, 仍然过高, 且存在负热膨胀材料产品单一的缺点。因此进一步开发具有不同种类且更加低热膨胀系数的负热膨胀材料将是实现聚合物基复合材料热膨胀系数低于  $10\times 10^{-6}/\text{K}$  行之有效的方法。

### 2.2.2 高热传导系数

微电子仪器及设备日益朝轻、薄、小的方向

发展, 芯片工作热环境向高温方向迅速移动, 电子元器件产生的热量迅速积累, 对其性能可靠性和使用寿命均产生不同程度影响。因此, 在使用环境温度下, 要使电子元器件仍能高可靠性地正常工作, 提高材料的散热能力成为影响其使用寿命的关键限制因素。基板作为封装材料的重要组成部分, 提高其热传导系数是解决散热问题的重要手段之一。开发高导热基板材料受到了工业界和科学家的广泛关注。基板绝缘层实现高导热性的方法主要分为:

#### (1) 无机填料选用及其高填充

此方法已经得到了广泛的研究, 被认为是最行之有效、最快捷的提高基板材料导热系数的方法<sup>[8]</sup>。相关的研究<sup>[9]</sup>包括对填料形状和粒度的选

择与控制, 以及对填料的高填充技术的研究。

①对填料形状和粒度的选择与控制, 以期望达到更佳的填充效果及导热效率。已有大量的研究通过添加绝缘导热填料提高材料导热系数。导热填料包括氮化硼(BN)<sup>[10-13]</sup>、氮化铝(AlN)<sup>[14-16]</sup>、氮化硅(Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>)<sup>[17]</sup>、氧化铝(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)<sup>[18]</sup>和碳化硅(SiC)<sup>[19]</sup>等。笔者所在课题组在此方面做了大量有意义的工作。如研究了 BN 含量对基板材料常用树脂基体双马来酰亚胺-氰酸酯(BT)树脂导热性能的影响, 揭示了复合材料制备-结构-性能三者之间的关系, 如图 1。研究发现, 随着 BN 含量的增加, BT 树脂导热性能逐步增加, 当 BN 含量为 50 wt% 时, 其最高导热系数为 1.11 W/(m·K)。进一步增加 BN 含量,

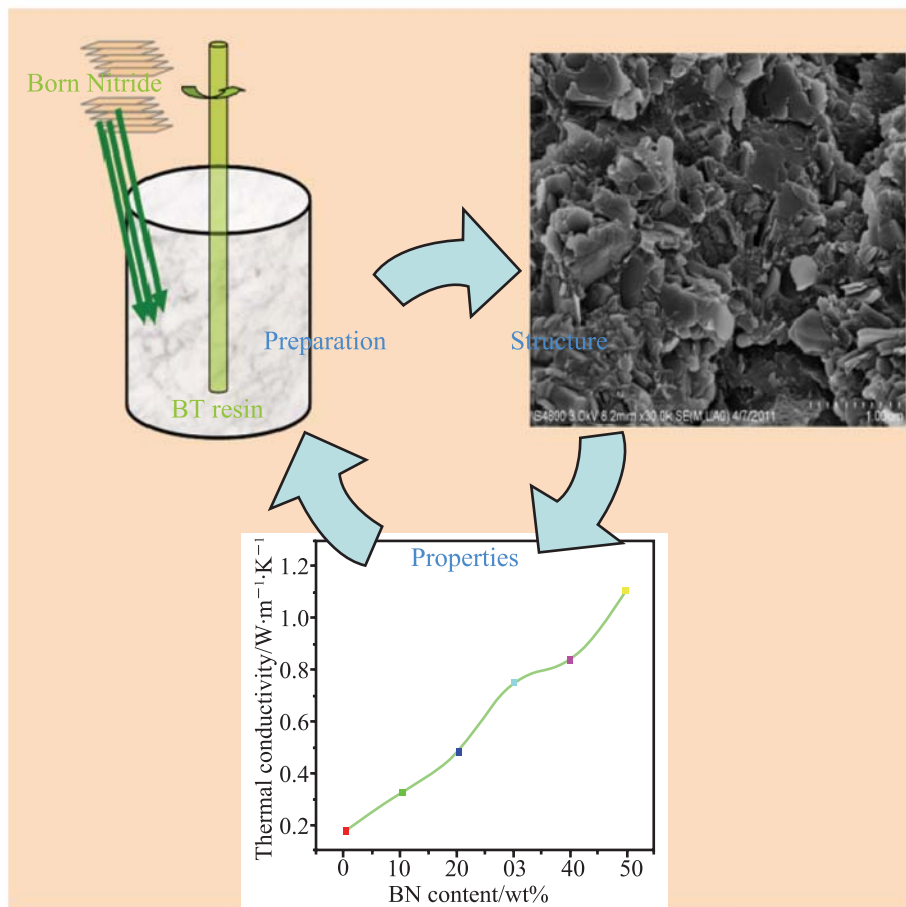


图 1 BT 树脂/BN 复合材料制备-结构-性能之间的关系<sup>[13]</sup>

Fig. 1. The relationship among preparation, structure and properties of BT resin/BN composites

则将使复合材料缺乏加工性能<sup>[13]</sup>。

考虑到  $\text{Si}_3\text{N}_4$  具有高导热系数, 我们还研究了  $\text{Si}_3\text{N}_4$  对 BT 树脂导热性能的影响。研究结果表明,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  的加入显著提高了 BT 树脂的导热性能。同样地, 当  $\text{Si}_3\text{N}_4$  含量为 50 wt% 时, 其最高导热系数为  $0.94 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ <sup>[20]</sup>。进一步增加  $\text{Si}_3\text{N}_4$  含量, 会使复合材料缺乏加工性能。鉴于碳纳米管具有高导热系数 ( $3000 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ), 我们期望通过添加碳纳米管提高基板材料的导热性能。但是碳纳米管同时还具有高导电性能, 限制了其在基板材料中的影响。为此, 我们在碳纳米管表面包覆一层 10 nm 以下的绝缘层 ( $\text{SiO}_2$ ), 希望在降低碳纳米管导电性能的同时, 维持其高导热系数。研究结果表明, 虽然碳纳米管具有高导热系数, 但是添加 4.0 wt% 纯碳纳米管时, 复合材料导热系数仅提高至  $0.39 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ; 添加  $\text{SiO}_2$  包覆的碳纳米管后, 复合材料导热系数没有发生明显变化 ( $0.38 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ )。

②对填料的高填充技术的研究主要从树脂中的混合技术、不同导热粒度的复合技术<sup>[21,22]</sup>、偶联剂处理技术<sup>[23]</sup>等方面开展。

### (2) 无机导热粒子的表面改性技术

提高粒子与聚合物的相容性, 可实现高的导热系数。如本课题组研究了不同表面改性的纳米、微米  $\text{Al}_2\text{O}_3$  对复合材料导热性能的影响。研究结果表明, 氧化石墨烯 (GO) 通过自组装将微米  $\text{Al}_2\text{O}_3$  连接在一起, 提高了复合材料的导热系数。GO 被证明在体系中起到连接  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的桥梁作用, 从而有利于导热通道的形成。另外, 我们研究发现, GO 对于纳米级  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的改性效果并不明显。然而导热性能的提高, 都离不开相关理论与测试技术的支撑。探索无机填料与聚合物热传导机理差异及实现对界面热阻的定量测试技术是未来导热研究的热点问题<sup>[24]</sup>。

### (3) 高导热性高聚物树脂的应用技术

一些研究者通过在聚合物树脂中引入高导热

性的基团(如液晶单元)来提高材料的导热性能; 另外, 通过在外力的作用下, 实现聚合物的定向排列同样可以大幅度提高聚合物的导热性能。如在 2010 年, Shen 等<sup>[25]</sup>在自然-纳米技术 (Nature Technology) 上报道了通过拉升作用实现聚乙烯分子定向伸长, 测得单个聚乙烯分子的导热系数高达  $104 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。外力作用下, 由于聚乙烯高的取向度而产生的高结晶度是实现其高导热的主要原因。Singh 等<sup>[26]</sup>以阵列纳米级铝孔为模板, 通过电化学方式实现了在纳米铝孔中聚合物反应制备了阵列聚噻吩纤维, 其导热系数达到  $4.3 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

总结复合材料基板研究进展, 展望未来, 我们认为复合材料基板材料的研究应在以下几个方面有所突破:

#### (1) 高韧性低膨胀基板材料的研究

通过添加无机颗粒, 特别是负热膨胀材料, 虽可以显著降低材料的热膨胀系数, 但同时也降低了材料的韧性。因此, 如何兼顾韧性与热膨胀系数是需要进一步的研究。采用静电纺丝技术制备负热膨胀纤维并将其应用于基板材料有望解决此问题。笔者所在课题组在此方面进行初步的探索。如为提高基板材料的韧性, 制备了聚乙二醇 (PEG) 改性的 BT 树脂基板材料。研究结果表明, PEG 的加入不仅提高了基板材料的韧性而且增加了其力学强度。PEG 的“桥梁作用”被认为是实现基板材料增韧增强的主要原因<sup>[27]</sup>, 如图 2。

#### (2) 导热性高聚物树脂的合成

虽然已有报道表明在外力等作用下可实现聚合物的高度取向, 但是相关研究主要集中于热塑性材料, 而基板材料常用的热固性树脂鲜有涉及。因此, 高导热树脂的研究有待进一步的探索。

#### (3) 无机材料与聚合物界面热阻的精确测量

界面热阻对材料的传热属性起到至关重要的作用, 因此研究材料的界面热阻具有重要的意义。随着微电子、光电子器件的尺寸日益向纳米尺

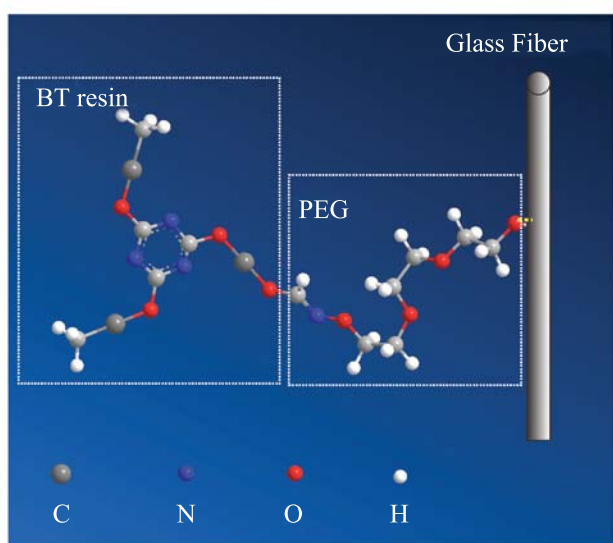


图2 PEG 增韧增强的“桥梁作用”

Fig. 2. Proposed “bridge effect” of PEG between glass fiber and BT resin

度发展, 组成这些微器件的材料界面热阻已逐渐成为微器件系统热管理和热设计的热点和难点。

### 2.3 有机基板

随着当前柔性电子, 尤其是可穿戴电子产品的“爆炸式”发展, 对柔性电子的载体-有机基板的要求也越来越高。本文将有机基板分为传统意义的塑料有机基板(包括聚酰亚胺(PI)、聚对苯二甲酸乙二酯(PET)和聚萘二甲酸乙二醇酯(PEN)基板)和近年来兴起的可降解有机基板。

#### 2.3.1 塑料有机基板材料

塑料有机基板材料是当前印刷电子行业的主流, 成为有机光伏、柔性显示、有机照明、柔性电子器件与电路及柔性集成智能系统的首选基板材料。近十年, 大多数有关柔性电子的研究主要集中在电子器件性能的提高, 如在有机光伏领域, 研究者更加关注光转化效率。随着研究的深入, 研究者发现基板材料对于提高柔性电子的综合性能发挥着重要的作用。开发更加柔性、透明化、低吸湿率、高耐热以及低成本化的基板材料是研究者非常关心的问题。近年来, 高折射率同时具有高透明度和低双折射的聚合物受到研究者

的广泛关注。但是常用的方法在提高折射率的同时降低了聚合物的透明度。You 等<sup>[28]</sup>为解决这一矛盾, 从分子结构设计出发, 将硫原子和三氰环单元引入聚苯基硫醚中。所制备的聚合物表现出高折射率(1.7492), 高透明以及优异的耐热性。聚酰亚胺(PI)是柔性基板中最为常用的材料, 但是其高热膨胀系数和低透明度限制了其在柔性电子中的应用。已有研究者从分子结构设计角度出发, 引入氟原子和脂环族单元等提高 PI 的透明度, 同时具备其他优异的性能<sup>[29]</sup>。其中具有代表性的是, Fukukawa 等<sup>[30]</sup>通过将双环戊二烯及环己烷结构引入 PI 分子链中, 显著提高了 PI 的透明度, 降低了 PI 的热膨胀系数, 其热膨胀系数最低至  $8 \times 10^{-6}/\text{K}$ , 甚至低于纯铜 ( $17 \times 10^{-6}/\text{K}$ ), 同时具有高的热稳定性(玻璃化转变温度  $>280^\circ\text{C}$ )。

#### 2.3.2 可降解有机基板材料

虽然塑料基板以其高的韧性和透明度成为目前印刷电子最为常用的基板材料。然而由于塑料无法降解, 最终会产生大量的电子垃圾。若能可将可降解的材料如最常用的纸张, 用于基板材料和电子产品, 可大大降低电子产品对环境的污染。而要将电子产品做在纸张上, 则面临不少困难, 对相关技术和制备工艺提出了挑战。普通纸张纤维粗, 透光但不透明。另外, 普通纸张的表面粗糙, 凹凸不平, 采用其作为基板材料, 不仅很难形成完整、连续、均匀的膜, 而且还容易导致晶体管漏电。针对上述存在的问题, 国内外科学家对普通造纸所用的木浆纤维进行特殊处理, 使其尺度达到纳米量级。所制备的“纳米纸”可有效减少对光的吸收和散射, 不仅变得透明, 而且其表面有如塑料一般光滑<sup>[31]</sup>。Hu 等<sup>[32-35]</sup>采用该纳米纸作为基板, 制造出由碳纳米管、绝缘层、有机半导体组成的可弯曲晶体管, 其透明度高达 84%。Hu 等<sup>[36]</sup>进一步考虑到纳米纸导热性差的问题, 同时纳米氮化硼具有高导热系数( $1000 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ),

通过将纳米氮化硼片引入纳米纸中, 制备了导热系数高达  $145.7 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  的基板材料。

随着研究的深入, 在满足高透明度、高柔性的同时, 研究者希望未来有机基板材料在如下几个方面有所突破: (1) 低吸湿率。高的基板材料吸湿率将会显著影响电子器件的稳定性及可靠性, 因此降低有机基板材料吸湿率显得尤为重要。(2) 高热导率。不同于传统的方式, 采用无机填料填充方式提高导热系数无法保持其高的透明性。因此, 在不影响透明度的情况下, 如何提高其导热性能是未来研究的重要方向之一。(3) 高热稳定性。电子器件的功率、密度的提升, 使其使用寿命受到普遍的关注。提高有机基板的热稳定性有利于提高有机电子器件的寿命和环境稳定性, 这对纳米纸基板材料显得尤为重要。

### 3 结 论

电子封装技术的飞速发展, 电子元件的高功率和日趋小型化以及柔性印刷电子器件的爆炸式发展, 对电子封装基板材料的固有性能提出了更高的要求。由于陶瓷基板存在质脆、制备工艺复杂等问题, 采用复合材料基板和有机基板取代陶瓷基板是未来电子封装基板的发展趋势。有机基板以其优异的柔性和高透明性受到了科学界和工业界的推崇, 成为当前研究的热点。性能方面, 高热导、高韧性以及高透明性是未来基板材料特别是有机基板材料追求的性能, 将会受到国内外研究者的广泛研究。目前电子封装基板材料主要存在以下两个科学问题: (1) 对于复合材料基板, 如何在提高其导热性能、降低热膨胀性能的同时兼具高透明性和优异的力学性能。(2) 对于有机基板材料, 如何在维持高柔性的同时, 提高其导热性能、维持低的热膨胀系数和高的热稳定性等。相信随着研究的深入和技术的推进, 这些问题终将得到解决。

### 参 考 文 献

- [1] 齐维靖. 大功率 LED 氮化铝陶瓷散热基板的制备 [D]. 南昌: 南昌大学, 2012.
- [2] 田民波, 林金堵, 祝大同. 高密度封装基板 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [3] 夏冬. 高膨胀低温共烧陶瓷基板材料性能研究 [D]. 上海: 华东理工大学, 2011.
- [4] 孙秀娟. 化学法制备负热膨胀性  $\text{ZrW}_2\text{O}_8$  粉体及薄膜 [D]. 镇江: 江苏大学, 2009.
- [5] 徐桂芳. 电子封装用可控热膨胀复合材料的制备与性能研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2008.
- [6] 张文学. 高导热低膨胀环氧塑封料的制备及性能研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2008.
- [7] Jin J, Ko J, Yang S, et al. Rollable transparent glass-fabric reinforced composite substrate for flexible devices [J]. *Advanced Materials*, 2010, 22(40): 4510-4515.
- [8] 周文英. 高导热绝缘高分子复合材料研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2007.
- [9] 李名英, 周曦亚, 王达, 等. 聚合物基绝缘导热复合材料的研究进展 [J]. *材料导报*, 2013, 27 (01): 80-84.
- [10] Harada M, Hamaura N, Ochi M, et al. Thermal conductivity of liquid crystalline epoxy/BN filler composites having ordered network structure [J]. *Composites Part B-Engineering*, 2013, 55: 306-313.
- [11] Lin Z, McNamara A, Liu Y, et al. Exfoliated hexagonal boron nitride-based polymer nanocomposite with enhanced thermal conductivity for electronic encapsulation [J]. *Composites Science and Technology*, 2014, 90: 123-128.
- [12] Huang X, Zhi C, Jiang P, et al. Polyhedral oligosilsesquioxane-modified boron nitride nanotube based epoxy nanocomposites: an ideal dielectric material with high thermal conductivity [J]. *Advanced Functional Materials*, 2013, 23 (14): 1824-1831.
- [13] Zeng X, Yu S, Sun R. Thermal behavior and dielectric property analysis of boron nitride-filled bismaleimide-triazine resin composites [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2013, 128 (3): 1353-1359.
- [14] Zhou Y, Yao Y, Chen C, et al. The use of polyimide-modified aluminum nitride fillers in  $\text{AlN}/\text{PI}/\text{Epoxy}$  composites with enhanced thermal conductivity for electronic encapsulation [J/OL]. *Scientific Reports*, 2014, doi: 10.1038/srep04779.

- [15] Choi S, Im H, Kim J. Flexible and high thermal conductivity thin films based on polymer: Aminated multi-walled carbon nanotubes/micro-aluminum nitride hybrid composites [J]. *Composites Part A-Applied Science and Manufacturing*, 2012, 43 (11): 1860-1868.
- [16] Zhou Y, Wang H, Wang L, et al. Fabrication and characterization of aluminum nitride polymer matrix composites with high thermal conductivity and low dielectric constant for electronic packaging [J]. *Materials Science and Engineering B-Advanced Functional Solid-State Materials*, 2012, 177 (11): 892-896.
- [17] Zhu Y, Chen K, Kang F. Percolation transition in thermal conductivity of beta-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> filled epoxy [J]. *Solid State Communications*, 2013, 158: 46-50.
- [18] Zhang S, Ke Y, Cao X, et al. Effect of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> fibers on the thermal conductivity and mechanical properties of high density polyethylene with the absence and presence of compatibilizer [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2012, 124 (6): 4874-4881.
- [19] Zhou T, Wang X, Mingyuan GU, et al. Study of the thermal conduction mechanism of nano-SiC/DGEBA/EMI-2,4 composites [J]. *Polymer*, 2008, 49 (21): 4666-4672.
- [20] Zeng X, Yu S, Sun R, et al. High thermal conductive BT resin/silicon nitride composites [C] // *Proceedings of 12th IEEE International Conference on Electronic Packaging Technology and High Density Packaging*, 2011: 1-3.
- [21] Hong J, Yoon S, Hwang T, et al. High thermal conductivity epoxy composites with bimodal distribution of aluminum nitride and boron nitride fillers [J]. *Thermochimica Acta*, 2012, 537: 70-75.
- [22] Pak SY, Kim HM, Kim SY, et al. Synergistic improvement of thermal conductivity of thermoplastic composites with mixed boron nitride and multi-walled carbon nanotube fillers [J]. *Carbon*, 2012, 50(13): 4830-4838.
- [23] Wattanakul K, Manuspiya H, Yanumet N. Effective surface treatments for enhancing the thermal conductivity of BN-filled epoxy composite [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2011, 119 (6): 3234-3243.
- [24] Cahill DG, Braun PV, Chen G, et al. Nanoscale thermal transport. II. 2003-2012 [J/OL]. *Applied Physics Reviews*, 2014, 1(1), <http://dx.doi.org/10.1063/1.4832615>.
- [25] Shen S, Henry A, Tong J, et al. Polyethylene nanofibres with very high thermal conductivities [J]. *Nature Nanotechnology*, 2010, 5(4): 251-255.
- [26] Singh V, Bougher TL, Weathers A, et al. High thermal conductivity of chain-oriented amorphous polythiophene [J]. *Nature Nanotechnology*, 2014, 9 (5): 384-390.
- [27] Zeng X, Yu S, Lai M, et al. Tuning the mechanical properties of glass fiber-reinforced bismaleimide-triazine resin composites by constructing a flexible bridge at the interface [J]. *Science and Technology of Advanced Materials*, 2013, 14(6): 065001.
- [28] You N, Higashihara T, Oishi Y, et al. Highly refractive-poly(phenylene thioether) containing triazine unit [J]. *Macromolecules*, 2010, 43(10): 4613-4615.
- [29] Damaceanu MD, Constantin CP, Nicolescu A, et al. Highly transparent and hydrophobic fluorinated polyimide films with ortho-kink structure [J]. *European Polymer Journal*, 2014, 50: 200-213.
- [30] Fukukawa K, Okazaki M, Sakata Y, et al. Synthesis and properties of multi-block semi-alicyclic polyimides for thermally stable transparent and low CTE film [J]. *Polymer*, 2013, 54(3): 1053-1063.
- [31] Nogi M, Iwamoto S, Nakagaito AN, et al. Optically transparent nanofiber paper [J]. *Advanced Materials*, 2009, 21(16): 1595-1598.
- [32] Fang ZQ, Zhu HL, Yuan YB, et al. Novel nanostructured paper with ultrahigh transparency and ultrahigh haze for solar cells [J]. *Nano Letters*, 2014, 14(2): 765-773.
- [33] Zhu H, Fang Z, Preston C, et al. Transparent paper: fabrications, properties, and device applications [J]. *Energy & Environmental Science*, 2014, 7(1): 269-287.
- [34] Huang J, Zhu H, Chen Y, et al. Highly transparent and flexible nanopaper transistors [J]. *Acs Nano*, 2013, 7(3): 2106-2113.
- [35] Zheng G, Cui Y, Karabulut E, et al. Nanostructured paper for flexible energy and electronic devices [J]. *MRS Bulletin*, 2013, 38(4): 320-325.
- [36] Zhu H, Li Y, Fang Z, et al. Highly thermally conductive papers with percolative layered boron nitride nanosheets [J]. *Acs Nano*, 2014, 8(4): 3606-3613.