

高密度系统级封装中的纳米材料和技术

朱朋莉¹ 孙蓉¹ 汪正平²

¹ (中国科学院深圳先进技术研究院先进材料中心 深圳 518055)

² (香港中文大学工程学院电子工程系 香港)

摘要 纳米材料和纳米技术在新型电子封装技术中发挥着越来越重要的作用, 纳米材料及其复合材料在电、磁、光等方面的优越性可以提高和改善元器件的物理、机械性能。本文介绍和评价了目前电子封装技术中出现的同封装材料密切相关的各类问题以及纳米材料、纳米复合材料和纳米技术等为解决这些问题方面的优势及发展方向, 并着重介绍了纳米金属导电颗粒、二氧化硅、碳纳米管、石墨烯等新材料在高密度系统级封装中的应用。

关键词 纳米材料; 纳米复合材料; 聚合物; 电子封装材料; 分散; 界面

Nanomaterials and Nanotechnologies in the High Density System Level Packages

ZHU Peng-li¹ SUN Rong¹ WONG Ching-ping²

¹ (Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China)

² (Department of Electronic Engineering, Faculty of Engineering, The Chinese University of Hong Kong, Hong Kong, China)

Abstract Nanomaterials and nanotechnology play more and more important role in the field of new generation electronics packaging. The unique electrical, magnetic and optical properties of the nanomaterials along with their composites can enhance and improve the physical and mechanical properties of the components. Current issues of electronic packaging, especially those related to materials, are introduced and evaluated in this review. The nanomaterials, nanocomposites and nanotechnology have advantages in solving these issues and their future development direction. This review also focuses on the application of new materials such as, conductive metal particles, silica, carbon nanotubes, graphene, etc. in the high density system level packages.

Keywords nanomaterials; nanocomposites; polymer; electronics packaging materials; disperse; interface

1 引言

电子技术发展的方向是高频高速、多功能、高性能、小体积和高可靠性, 封装技术在集成电路(IC)产品中扮演着越来越重要的角色, 以往在模块层次上实现的功能如今要求在封装层次上实现。随着集成电路特征尺寸进入纳米量级, 集成电路产品的封装形式

也从二维过渡到了三维, 向着更高密度的方向发展。三维系统级封装是最具代表性的高密度封装技术, 能将数字、模拟、微波、光电、MEMS等不同工艺制作的芯片和多种无源元件集成在一个封装模块内, 可广泛应用于无线通信、地理导航、电脑、音响、电视、游戏以及电子摄像等电子设备。系统级封装技术涵盖了设计、工艺、测试、材料等多个技术领域, 被称为“新一代电子封装技术”, 在国际上受到广泛的关注

基金项目: 国家自然科学基金(21101165); 国家科技重大专项(2009ZX02038); 广东省引进创新科研团队计划资助(2011D052)。

作者简介: 朱朋莉, 助理研究员, E-mail: pl.zhu@siat.ac.cn; 孙蓉, 研究员, 博士生导师, 研究方向为结构可控纳米微粒的制备、有机-无机复合功能性材料; 汪正平, 美国国家工程院院士, 香港中文大学电子工程学系教授, 工程学院院长, 研究方向为聚合电子材料、电子、光子及微机电器件封装及互连材料、界面结合、纳米功能材料的合成和特性等。

与重视。能否实现高性能、低成本的封装结构,关系到后续产品的产业化前景和市场占有率,而其中封装材料起着决定性的作用。电子封装材料在封装技术中用于承载电子元器件及其互连,起机械支撑、密封、散热等作用。现代科学技术尤其是高密度系统级封装技术的发展对电子封装材料提出了更高更全面的要求,致使以往的传统材料已不能满足元器件及半导体芯片更高的性能要求,研制开发新型的电子封装材料已成为各国竞相追求的目标^[1]。从2003年到2010年世界半导体行业的发展数据来看,材料从256亿美元增长至560亿美元,增幅2.2倍,而中国从15亿美元增长至110亿美元,增幅7倍,说明半导体行业的发展也越来越依赖于半导体材料行业的发展,中国半导体材料行业发展也越来越快。芯片是半导体的核心,而电子材料是基础,电子产品的效率呈指数增长,其增长离不开新材料的发展。

本文简要总结了目前高密度系统级封装中出现的同封装材料直接相关的部分问题,重点介绍了几种新型电子封装材料解决这些问题表现出的优异性以及纳米材料在封装技术应用过程中的共性问题。

2 同封装材料相关的问题

在高密度系统级封装技术发展中的同材料相关问题或者未来发展直接依赖于新材料的问题主要集中在以下几个方面:

2.1 埋入式无源器件的开发

随着电子设备高度集成化和小型化的发展,无源器件使用量也随摩尔定律急剧增大,电子元件之间的干扰使用性能差。而且由于大量无源器件的使用,使基板的体积问题尤为突出,已经成为当前高密度封装领域一个重要的研究课题——如何有效利用有限的基板空间,最大化提高器件的使用性能,解决方法之一是使用埋入式技术,将基板上绝大多数的分立元件由埋入式器件来替代(包括电容、电阻、电感等),埋入到印刷电路板内部,缩短元件相互间的线路长度,增加电路板的有效封装面积,减少焊接点,改善电气特性,提高封装可靠性。以埋入式电容为例,为适应有机基板的发展,研究人员开发了聚合物基复合电介质材料,这类复合材料集成了不同相材料的优点,也避免后续如陶瓷基板的高温烧结工艺,降低生产成本。但随着技术标准的提高,传统聚合物微米复合材料在很多领域已经难以满足要求^[2],纳米技术的出现

使复合材料的发展进入了一个崭新的时代,与聚合物微米复合材料相比,纳米复合材料具有许多优异性能,但纳米复合材料可能具有不同于微米复合体系的相关复合理论、物理性能机制、界面作用等关键问题,也需引起学术界和工业界的广泛关注。

2.2 散热问题

随着芯片集成度、封装密度和工作频率的提高,功率与体积的比值日益增大,造成电子产品在高功能、高传输速率工作状态下,芯片的热流密度迅速增加,发热功率越来越大,从而使芯片散热面临严峻的考验。目前,芯片的散热主要依靠热界面材料(Thermal Interface Materials, TIM)用于填补两种材料接合或接触时产生的微孔隙及表面凹凸不平的孔洞,减少热传递的阻抗,提高散热性,最终将芯片与基板、基板与散热系统连结,使芯片产生的热量尽快导出并最终在散热系统中耗散掉。现有的商用热界面材料主要为添加导热金属粉、无机填充料等(根据情况有时也不添加)的聚合物和Pb或无Pb的低熔点金属合金焊料,热导率通常低于50 W/mK(聚合物基TIM低于20 W/mK),且存在容易溢出及相分离、易老化、不耐疲劳和腐蚀等问题,是整个散热系统中最薄弱的环节和制约整个系统散热效率的短板,越来越难以满足芯片发展的需要,因此,发展高性能的TIM刻不容缓。影响热界面材料特性的主要因素有:热界面材料的热传导率和界面阻抗^[3,4]。热传导率的提高和降低界面阻抗、导热填料填充体积百分率、填料在高分子基体中的分散性、填料同高分子基体界面间的相互作用等紧密相关。

2.3 机械应力

倒装芯片技术在多芯片组建和三维系统封装中被广泛使用,它可以消除对引线键合连接的要求,缩短互连距离,提高输入/输出(I/O)密度,占用空间小等特点。但由于有机基板和芯片的热膨胀系数无法保证完全匹配,导致回流焊和温度循环时在焊球处产生很大的应力,严重时会引起裂损现象,因此,倒装芯片一般采用底部填充技术来避免这一问题。当芯片与基板之间填充热固性环氧树脂后,由于树脂的粘结作用,应力将被重新分配,使芯片、基板和焊接点之间的热膨胀系数不匹配程度降到最低,大大提高封装的可靠性。在目前底部填充材料开发中,采用物理或化学的方法使底部填充技术可修复,促进了倒装芯片技术的推广。但传统底部填充料普遍存在的问题是填料点胶均匀性不好,容易造成界面老化剥离,导致器件

机械和电气可靠性降低^[5]。因此需要开发新型的可修复底部填充材料，在保证其流动性、可靠性、保存时间的条件下，进一步降低固化温度，提高固化速度，并允许在安全温度下对已粘接的芯片进行修复，降低生产成本，保证可修复过程中的基板无残留。

3 几种新型电子封装材料

针对以上问题，本文从高密度系统级封装中最具有应用开发前景的几种纳米材料的研究出发，利用纳米材料的特殊性能来解决以上问题，主要涉及的新型材料有：纳米导电金属颗粒、二氧化硅、碳纳米管、石墨烯等。

3.1 纳米导电颗粒

当材料的尺寸减小到纳米量级时，材料将具有表面效应、小尺寸效应和宏观量子隧道效应等，表现出同块体材料不同的光、热、电、磁、力学以及化学等性质，对于纳米金属导电颗粒而言，经过近十几年来纳米制备科学的发展，初步形成了环境友好的制备方法和体系，颗粒的尺寸和形貌可以通过实验方法进行良好控制，如Ag、Cu、Ni、Au等纳米颗粒及其合金。金属颗粒纳米化后熔点、烧结温度大大降低，具有库伦阻塞效应等。目前，导电颗粒在电子封装中的主要应用领域有：

(1) 导电颗粒用于提高复合材料的介电常数

当陶瓷填料的体积分数到50-60%时，两相体系的复合材料可以获得较高的介电常数，但当继续加大陶瓷填料的用量时，在复合材料中会出现孔洞断裂等，使材料的介电常数和击穿电压急剧下降。使用导电填料的复合体系存在渗流效应，在渗流阈值附近复合材料的介电常数发生突变，可达1000以上，填料的使用体积分数可以大大降低。Dang等^[6]采用热压成型法制备了Ni/P(VDF-TrFE)复合材料，在渗流域值附近，介电常数最高可达400，表现出较弱的温度和频率依赖性，介电损耗低于0.20。Lu等人^[7]采用原位法生成Ag纳米颗粒制备Ag/epoxy和Ag/CB/epoxy复合薄膜，后者在10kHz下具有大于2000的介电常数。与空白体系相比，Ag纳米颗粒的原位生成提高了介电常数、降低了介电损耗，作者认为这源于库伦阻塞效应。Ag纳米颗粒的含量、粒径大小和粒径分布情况对介电常数有非常大的影响。以上可以看到，导电颗粒的使用可以大幅提高复合材料的介电常数，但对于导电颗粒填充的聚合物复合体系，由于渗流阈值的存在，使复合体

系的性能对填料的浓度和填料在基体中的显微结构具有强烈的依赖性。再者，这类材料通常会因为介电损耗较大而在电场下产生较大的热量，给复合材料的制备和性能的重复性带来较大难度。改进的方法之一是将导电填料和陶瓷填料共同添加到聚合物基体中，形成三相体系，在获得较高介电常数的同时具有低的介电损耗。Dang等人^[8]制备了Ni/BaTiO₃/PVDF三相复合材料，在保持BaTiO₃的体积分数为40%，Ni的体积分数从0%增加到23%时，体系的介电常数从40增长至800，介电损耗为0.5。另外，对导电颗粒的结构进行设计，在其表面形成有效钝化层，避免颗粒之间的直接接触导通也是解决的方法之一。Xu等^[9]制备了Al/BPA epoxy(双酚A树脂)复合材料。分别选取3.0 μm、10.0 μm、100 nm的Al颗粒作为填料，在相同的质量分数下，颗粒越小，介电常数越大。研究还发现Al颗粒可以填充到很高的质量分数(85%)而不发生渗流，其原因是Al颗粒表面由于自钝化作用形成了Al₂O₃绝缘层，使颗粒之间不至于导通。Shen等^[10]采用溶剂热法制备了Ag@C核壳结构纳米颗粒，在EGME(乙二醇甲醚)作用下与树脂、固化剂形成溶液，旋涂制备85 μm厚的薄膜。研究结果表明：该核壳结构所形成的内部边界层网络结构可以得到高介电常数(超过400)和低介电损耗(低于0.04)，有机壳层可以增强Ag@C纳米颗粒在树脂基体中的分散性，具有很好的温度、频率、外部电场稳定性。Zhang等人^[11]也研究过采用激光诱导加热法制备的Ni@C核壳结构纳米微粒与epoxy形成复合材料的介电性能。

(2) 导电颗粒用于制备导电胶

在微电子组装中，导电胶逐渐代替传统的锡铅焊料。导电胶具有不同的分类，按导电性能的不同可以分为各向同性导电胶(ICA)和各向异性导电胶(ACA)，研究较多的是ACA。导电填料是导电胶的关键组分，它赋予导电胶以导电性能。Li等人^[12]制备了单分子层保护纳米银粒子填充ACA的研究。用处理过的粒径约50 nm的银填充环氧到环氧树脂中，DSC测试表明，纳米银粒子对树脂的热固化行为没有影响。对处理和未处理的2组样品进行体积电阻率测试，后者为10⁻³ Ω·cm，而前者达到10⁻⁴-10⁻⁵ Ω·cm，同时热导率也提高了35%。

3.2 碳纳米管

碳纳米管作为一维纳米材料，重量轻，六边形结构连接完美，具有许多异常的力学、电学和化学性能。近些年随着碳纳米管及纳米材料研究的深入，其

广阔的应用前景也不断地展现出来。目前,碳纳米管及其相关技术已在电子封装技术中的互连、热界面材料、导热、介电、导电胶等领域得到较为深入的研究,并取得了重要的研究进展。

(1) 碳纳米管应用于互连技术

互连技术直接决定器件的性能和可靠性,是造成电路板失效的重要原因。在微电子器件中有两种类型的互连:水平的和垂直的。水平互连用于连接集成电路板上各部分之间的晶体管。在现有工艺条件下的线路板中有多达12层的互连。每层之间依靠多孔SiO₂或者掺杂有C、F的SiO₂介电层隔离,这些材料具有较差的机械加工性,耐受温度在450℃以下。随着集成电路密度的增加,电传输密度将增加,许多材料将不再合适,而碳纳米管能够承受的电流密度可达 $\sim 10^9$ A/cm²。垂直通孔互连技术常用的是金属铜,在通孔互连处,由于高电流密度和电流密度分布的不均匀导致产生电迁移使得互连失效。未来纳米级互连的替代方案包括导电聚合物、金属化的DNA、金属纳米线和金属性的CNT^[13]。其中,计算机模拟表明碳纳米管最具优势,并且在功率、延迟、串扰和可靠性方面的性能都要优于铜。有研究称,在45 nm以下的工艺制程中,铜互连工艺不如碳纳米管的性能。为了更好地利用碳纳米管的“弹道导电”特性,碳纳米管必须端部开口才能具有较好的润湿性和同Sn/Pb更好的接触,随着碳纳米管制备工艺的逐渐成熟,碳纳米管互连技术也得到突破性进展。Fujitsu和Infineon在碳纳米管的互连方面做过大量的研究,他们在蚀刻的孔洞底部沉积生长碳管的催化剂,移除多余的催化剂后利用CVD的方法在通孔中生长碳纳米管^[14-16]。

(2) 碳纳米管用于热界面材料

碳纳米管在轴向方向上具有良好的热导性。Berber等人^[17]通过分子动力学模拟发现单壁碳纳米管的导热系数在室温下高达6600 W/mK,单根多壁碳纳米管在室温下的热导率也高于3000 W/m。Dai等人^[18]利用高频电测量系统研究300~800 K温度变化内,长2.6 μm,直径1.7 nm的单壁碳纳米管的导热系数为3500 W/mK。Hone等人^[19]研究了具有取向性和非取向性的单壁碳纳米管在10~400 K内的导热系数,发现碳纳米管的导热系数随温度的上升而增加,具有取向性碳纳米管的导热系数为200 W/mK,而非取向性碳纳米管的导热系数为30 W/mK。Yi等人^[20]测试了微米长度取向碳纳米管的导热系数,在室温下由于碳纳米管存在缺陷,导

热系数仅为25 W/mK,而经3000℃的高温处理使表面缺陷减少后导热系数可达2000 W/mK。由于采用的测试和模拟方法、碳纳米管阵列的状态以及碳管的结构、性质(如碳管长度、壁数、缺陷浓度等)的差异,目前碳纳米管导热特性的测试结果差异较大,但整体可以看到碳纳米管具有良好的导热性能。但在作为热界面材料应用时,以往由于碳纳米管各向异性的结构特点以及与其他材料接触界面热阻过大的缺点严重阻碍了其作为导热材料的潜力,随着CVD可控制备大面积良好取向碳纳米管技术的不断发展,碳纳米管阵列中各管的相互平行排列使碳纳米管的高导热率由杂散的两点之间转到两平行平面之间,提供了热运输的完美结构,界面热阻也大大降低,使碳纳米管在热界面材料中的应用成为可能。碳纳米管阵列作为热界面材料使用时,阵列中碳管的密度、高度、直径、壁数,碳管的缺陷和杂质等,直接影响碳管的本征热导率和热阻;另外,碳纳米管同基底的接触热阻也是将碳纳米管阵列应用于热界面材料的研究重点。碳纳米管阵列生长最常用基底是硅,但硅的热导率不及Cu、Al等材料,为了更有效地将碳管阵列作为TIM,金刚石^[21]、Cu^[22]、Al^[23]、SiC^[24]等高导热材料被用来代替Si作为阵列生长的基底,均展示出较低的热阻。但使用金属作为碳纳米管阵列生长基底时,存在碳纳米管与基底热运输机理不同的问题,界面接触热阻过大^[25]。而使用与碳纳米管导热机理相同的SiC、石墨等,理论上在其上生长的阵列应当与基底具有较低的接触热阻,特别是与碳纳米管同为sp²杂化的热解石墨片甚至石墨烯等,如能在其上生长碳纳米管阵列并实现与基底的稳定接触,可能得到最佳的被动式散热结构组合。由于直接在其他基底上生长阵列的工艺相对于在硅基底上生长阵列仍不成熟,另外,CVD方法制备碳纳米管阵列的合成温度通常在600℃以上,该温度高于电子器件生产线的加工温度(400~500℃),因此也迫切需要发展碳纳米管阵列的转移技术,将硅基底上生长的质量优良碳管阵列转移至其他它基底上。其中,Wong教授在碳纳米管阵列转移方法上做了大量研究工作,相继提出了回流焊(图1示)^[26]、银胶^[27]、化学锚定^[28]等多种阵列转移方法,均能将碳管阵列完整转移到其他基底上。相对于传统热界面材料而言,碳纳米管阵列具有高导热、热导率各向异性、径向面内低热膨胀系数、轻质、抗老化、抗氧化等突出优点,是目前能够适应不断提高了的芯片功率的最佳热界面材料。虽然碳纳米管阵列用于电子器件的散热还存在着

性能、材料设计、价格、封装工艺等一系列问题，但无可否认的是，其在热界面材料领域的巨大潜力，必将吸引科研工作者和技术开发人员对其进一步的研究和发掘^[4]。

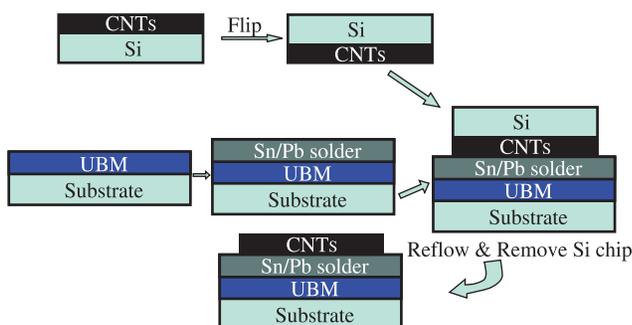


图1 利用类似“回流焊”技术发展的碳纳米管阵列转移示意图^[26]

(3) 碳纳米管应用于制备各向同性导电胶

吴海平等人^[29]制备了以碳纳米管（CNTs）和镀银碳纳米管（SCCNTs）为导电填料的各向同性导电胶。研究发现：CNTs作为导电填料时，在填料体积分数为31%时出现体积电阻率的最低值 $2.4 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ ；在填料体积分数同为28%时，填充SCCNTs导电胶具有最低的体积电阻率 $2.2 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ ；在85℃、RH 85%环境下经过1000 h老化测试结果表明，填充SCCNTs或CNTs导电胶体积电阻率和剪切强度的变化均不超过10%；而填充微米量级银粒子导电胶在老化后体积电阻率和抗剪切强度的变化分别达到350%和120%。

3.3 二氧化硅

由于高纯球形纳米 SiO_2 具有高介电、高耐热、高耐湿、高填充量、低膨胀、低应力、低杂质、低摩擦系数等优越性能，在大规模、超大规模集成电路的基板和封装料中成为不可缺少的新型优质材料^[30]。纳米 SiO_2 主要被用作树脂基板填料和底部填充材料使用。 SiO_2 的热膨胀系数为 $(0.3 \sim 0.5) \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ ，当纳米 SiO_2 添加到环氧树脂中后，球形颗粒具有较好的流动性，各向同性好，可以大幅度降低基体的热膨胀系数；由于纳米 SiO_2 表面严重的配位不足、庞大的比表面积，处于欠氧状态，表现出极强的活性，很容易和环氧树脂中的氧发生键合作用，增加了分子之间的作用力，从而提高复合材料的强度。同时还有一部分纳米 SiO_2 颗粒分布于高分子的孔隙中，这部分颗粒表现出很高的流动性，使复合材料的强度和韧性大幅度提高。另外由于纳米 SiO_2 的高流动性和小尺寸效应，使复合材料表面更加致密，摩擦系数变小，耐磨性增强，表面光洁度也有所增加。纳米 SiO_2 对紫外光具有极强的反射特性，从而可以降低紫外光对环氧树脂的降解作用，

提高环氧树脂的抗老化性能同时使板材具有紫外光屏蔽功能。利用纳米 SiO_2 的高介电特性和抗静电特性，可以生产低频和静电屏蔽覆铜板^[31, 32]。

3.4 石墨烯

二维结构的石墨烯自2010年获得诺贝尔物理学奖以来引起了人们的广泛关注，将其应用于科学研究的各个领域。同样，研究者也将石墨烯应用于新型电子封装领域，并在热、电等领域展现了其独特的性能。研究显示：石墨烯的导热性能优于碳纳米管，单层石墨烯的导热系数可达5300 W/mK，甚至有研究表明其导热系数高达6600 W/mK。优异的导热性能使得石墨烯有望作为未来超大规模纳米集成电路的散热材料^[33-35]。Yu等人^[36]制备了石墨烯-环氧树脂的复合材料，研究结果表明：当石墨烯片的添加量为25%（体积分数），环氧树脂的热导率达到6.44 W/mk，比纯环氧树脂的增大30倍。而传统添加剂需要70%（体积分数）的添加量才能达到该数值。Wong等人^[37]利用室温过滤的方法将表面功能化的石墨烯有序堆叠形成厚1.05 mm，直径32 mm大小的块体材料，该材料具有各向异性，在水平方向的电导率为386 S/cm，垂直方向为6.1 S/cm，水平方向的导热系数为112 W/mK，垂直方向为1.62 W/mK，热膨胀系数为-0.71 ppm/K。将多层石墨烯作为热界面材料通过钎垂直组装入硅与硅基底，测得的导热系数为75 W/mK，界面热阻为5.1 mm² K/W。华南理工大学^[38]将片层结构完整的石墨烯引入到纳米银/环氧导电复合材料中，充分发挥石墨烯纳米片层的结构优势，加强导电网络，提高导热性能，并同步实现纳米银的低温烧结，降低导电粒子间的接触电阻，提高导电胶的导电性，制备高导电性的纳米导电胶，同时实现对导电胶基体树脂的补强。综上显示，石墨烯具有优异的导热性能，尤其是单层石墨烯具有广泛的应用前景。但由于石墨烯种类的多样性和作用的复杂性，深入探索其结构和性能是一项长期的工作，也要进一步研究石墨烯及其复合材料的导热机理，复合材料分布状况，系统研究石墨烯与基体各参数的改变对导热性能的影响，如不同复合技术对石墨烯与基体的复合程度及导热系数影响。

4 结论及展望

以上综述了几种新型纳米材料在电子封装领域的应用并初步显示了这些新材料或材料纳米化后在解决电子封装技术中相关问题时的优势，但也存在着如下

一些共性问题,如材料尺寸减小后的颗粒团聚问题,纳米材料的宏量制备技术,纳米材料同聚合物形成复合材料之后的分散和界面问题等,因此要在以下几个问题上进行深入研究:

(1) 纳米材料制备技术

开发适用于系统级封装材料的纳米制备技术,并进一步宏量放大实现工业化量产。研究尺度、维度、表面物理化学结构可控的液相化学合成工艺,发展纳米材料的纯化技术。

(2) 纳米微粒与聚合物材料的复合技术

通过纳米微粒表面改性等方法改善纳米微粒在聚合物基体内的分散性、相容性;研究纳米微粒表面微观结构对聚合物基体的聚合反应、结构等的影响规律;开发聚合物纳米复合材料稳定制备工艺。

(3) 复合材料中基础理论的研究与模拟

复合材料中导热、导电、渗流等理论进行修正以及提出新的模型体系,尤其是当填料尺寸纳米化后新现象的分析总结,构建有效的理论模型。

(4) 利用多类填料的协同作用和核壳材料等新结构材料,开发具有其他特殊性能的复合材料。

后记:本课题组在国家重大科技专项“极大规模集成电路制造装备及成套工艺”系列项目与课题的支持下,研发内容覆盖与系统级封装相关的各个关键材料领域,包括芯片倒装下填料、TSV三维硅通孔材料、埋入式器件材料、以及高性能基板材料等,尤其在基板基础材料的合成与埋入式功能材料方面开展了深入的研究^[39-43],部分研发成果已进入中试阶段。

汪正平院士是蜚声国际的电子工程学专家,其研究领域包括聚合物电子材料、电子、光子及微电子器件封装及互连材料、界面结合、纳米功能材料等。曾成功开创多种崭新材料,为半导体的封装技术带来革命性影响,多年来其研究成果丰硕。目前,也积极引领纳米材料和纳米技术在微电子封装中的应用。出版《高分子在电子和光子学应用》、《电子封装设计、材料、过程和可靠性》、《电子制造:无铅、无卤和导电胶材料》、《高级电子封装材料》、《纳米导电胶技术》等学术专著。

参 考 文 献

[1] Zheng X H, Hu M, Zhou G Z. Status and prospects of new materials for electric packing [J]. Journal of Jianmsi University (Natural Science Edition), 2005, 23(3): 460-464.

[2] Huang X Y, Jiang K P, Jin T X, et al. Polymer nanocomposite dielectrics [J]. Progress in chemistry, 2007, 19(11): 1776-1782.

[3] Chen W Y, Yang B C, Hu Y D. Thermal interface materials and its application [J]. Hybrid Microelectronics Technology, 2006, 17(1): 42-53.

[4] Chen H Y, Zhou Z P, Li Q W. Application of carbon nanotube array as thermal interface materials: the state of the art [J]. Materials Review, 2010, 24(6): 1-6.

[5] Yu K, Liang T X, Guo W L. Development of reworkable underfill materials for flip chip [J]. Semiconductor Technology, 2008, 33(6): 466-469.

[6] Dang Z M, Lin Y H, Nan C W. Novel ferroelectric polymer composites with high dielectric constants [J]. Advanced Materials, 2003, 15(19): 1625-1629.

[7] Lu J X, Moon K S, Xu J W, et al. Synthesis and dielectric properties of novel high-k polymer composites containing in-situ formed silver nanoparticles for embedded capacitor applications [J]. Journal of Materials Chemistry, 2006, 16(16): 1543-1548.

[8] Dang Z M, Shen Y, Nan C W. Dielectric behavior of three-phase percolative ni-batio3/polyvinylidene fluoride composites [J]. Applied Physics Letters, 2002, 81(25): 4814-4816.

[9] Xu J W, Wong C P. Low-loss percolative dielectric composite [J]. Applied Physics Letters, 2005, 87(8): 082907.

[10] Shen Y, Lin Y H, Li M, et al. High dielectric performance of polymer composite films induced by a percolating interparticle barrier layer [J]. Advanced Materials, 2007, 19: 1418-1422.

[11] Zhang B W, Xie C S, Hu J H, et al. Novel 1-3 metal nanoparticle/polymer composites induced by hybrid external fields [J]. Composites Science and Technology, 2006, 66(11): 1558-1563.

[12] Li Y, Moom K S, Wong C P, et al. Monolayer-protected silver nanoparticle based anisotropic conductive adhesives [J]. Journal of Electronic Materials, 2005, 34(12): 1573-1578.

[13] Singer P. Carbon Nanotubes: Attractive alternative to the interconnection [J]. Applications of IC, 2007, 7: 22.

[14] Nihei M, Kawabata A, Kondo D, et al. Electrical Properties of carbon nanotube bundles for future via interconnects [J]. Journal of Electronic Materials, 2005, 44(4A): 1626-1628.

[15] Hoenlein W, Kreupl F, Duesberg G S, et al. Carbon nanotubes for microelectronics: status and future prospects [J]. Materials Science and Engineering: C, 2003, 23(6): 663-669.

[16] Awano Y J. Carbon nanotube technologies for lsi via interconnects [J]. IEICE Trans Electron., 2006, E89-C(11): 1499-1503.

[17] Berber S, Kwon Y K, Tomanek D. Unusually high thermal conductivity of carbon nanotubes [J]. Physical Review Letters, 2000, 84(20): 4613-4616.

[18] Pop E, Mann D, Wang Q, et al. Thermal conductance of an individual single-wall carbon nanotube above room temperature

- [J]. *Nano Letters*, 2006, 6(1): 96-100.
- [19] Hone J, Liaguno M C, Nemes N M, et al. Electrical and thermal transport properties of magnetically aligned single wall carbon nanotube films [J]. *Applied Physics Letters*, 2000, 77(5): 666-668.
- [20] Yi W, Lu L, Zhang D L, et al. Linear specific heat of carbon nanotubes [J]. *Physical Review B*, 1999, 59(14): R9015-R9018.
- [21] Xu J, Timothy S F. Thermal interface properties of carbon nanotubes on diamond [R]. The 2005 Annual Meeting. Cincinnati, OH, 2005.
- [22] Baratunde A C, Xu X F, Timothy S F. Increased real contact in thermal interfaces: a carbon nanotube/foil material [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 90(9): 093513.
- [23] Zhang K, Yuen M M F, Xiao D G W, et al. Directly synthesizing cnt-tim on aluminum alloy heat sink for hb-led thermal management [C] // 2008 Electronic Components and Technology Conference. Lake Buena, Florida, 2008: 1659-1663.
- [24] Baratunde A C, Xu X F, Timothy S F, et al. Carbon nanotube array thermal interfaces for high temperature silicon carbide devices [J]. *Nanoscale and Microscale Thermophysical Engineering*, 2008, 12(3): 228-237.
- [25] Li Q W, Liu C H, Fan S S, et al. Thermal boundary resistances of carbon nanotubes in contact with metals and polymers [J]. *Nano Letters*, 2009, 9(11): 3805-3809.
- [26] Zhu L, Sun Y Y, Hess D W, et al. Well-aligned open-ended carbon nanotube architectures: an approach for device assembly [J]. *Nano Letters*, 2006, 6(2): 243-247.
- [27] Jiang H J, Zhu L B, Moon K S, et al. Low temperature carbon nanotube film transfer via conductive polymer composites [J]. *Nanotechnology*, 2007, 18(12): 125203.
- [28] Lin W, Xiu Y H, Jiang H J, et al. Self-assembled monolayer-assisted chemical transfer of in situ functionalized carbon nanotubes [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2008, 130: 9636-9637.
- [29] Wu H P, Wu X J, Liu J F, et al. Properties of isotropical conductive adhesives filled with carbon nanotubes [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2006, 23(2): 9-13.
- [30] 孙忠贤. 环氧塑封料的填充料二氧化硅的性能及应用 [A]. 第六届全国粉体工程学术论文集 [C] // 北京: 第六届全国粉体工程学术会, 2000, 32.
- [31] Feng Q B, Liu L, Long C K. The Application of Aerosil in Resin Matrix Composites Silicon and Fluorine Information, 2007, 9:45-46.
- [32] Ding Y, Dan H, Lin J H. Study on the application of high purity spherical nano-sio₂ to the materials of electronic encapsulation [J]. *Materials Review*, 2005, 19(V): 150-159.
- [33] Ghosh S, Calizo I, Teweldebrhan D, et al. Extremely high thermal conductivity of graphene: prospects for thermal management applications in nanoelectronic circuits [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(15): 151911-151913.
- [34] Schwamb T, Burg B R, Schirmer N, et al. An Electrical method for the measurement of the thermal and electrical conductivity of reduced graphene oxide nanostructures [J]. *Nanotechnology*, 2009, 20(40): 1-5.
- [35] Zhou C Y, Zeng L, Ji L, et al. Research on the thermal conductivities of graphene and graphene based composite materials [J]. *Development and Application of Materials*, 2010, 25(6): 94-100.
- [36] Yu A P, Ramesh P, Itkis M E, et al. Graphite nanoplatelet epoxy composite thermal interface materials [J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2007, 111(21):7565-7569.
- [37] Liang Q Z, Yao X X, Wang W, et al. A Three-dimensional vertically aligned functionalized multilayer graphene architecture: an approach for graphene-based thermal interfacial materials [J]. *ACS Nano*, 2011, 5: 2392-2401.
- [38] 刘孔华, 华南理工. “赛莱拉”第十二届“挑战杯”大学生课外学士及科技作品竞赛.
- [39] Yang W H, Yu S H, Sun R, et al. Nano- and microsize effect of ccto fillers on the dielectric behavior of ccto/pvdf composites [J]. *Acta Materialia*, 2011, 59(14): 5593-5602.
- [40] Yang W H, Yu S H, Sun R, et al. Electrical modulus analysis on the ni/ccto/pvdf system near the percolation threshold [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2011, 44(47): 475305.
- [41] Zeng X L, Yu S H, Sun R, et al. Microstructure, thermal and dielectric properties of bismaleimide-triazine/barium titanate nanocomposite film [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2011, 131(1-2): 387-392.
- [42] Zhao T, Sun R, Yu S H, et al. Size-controlled preparation of silver nanoparticles by a modified polyol method [J]. *Colloid Surface A*, 2010, 366(1-3): 197-202.
- [43] Fan Y H, Yu S H, Sun R, et al. Microstructure and electrical properties of mn-doped barium strontium titanate thin films prepared on copper foils [J]. *Applied Surface Science*, 2010, 256(22): 6531-6535.