

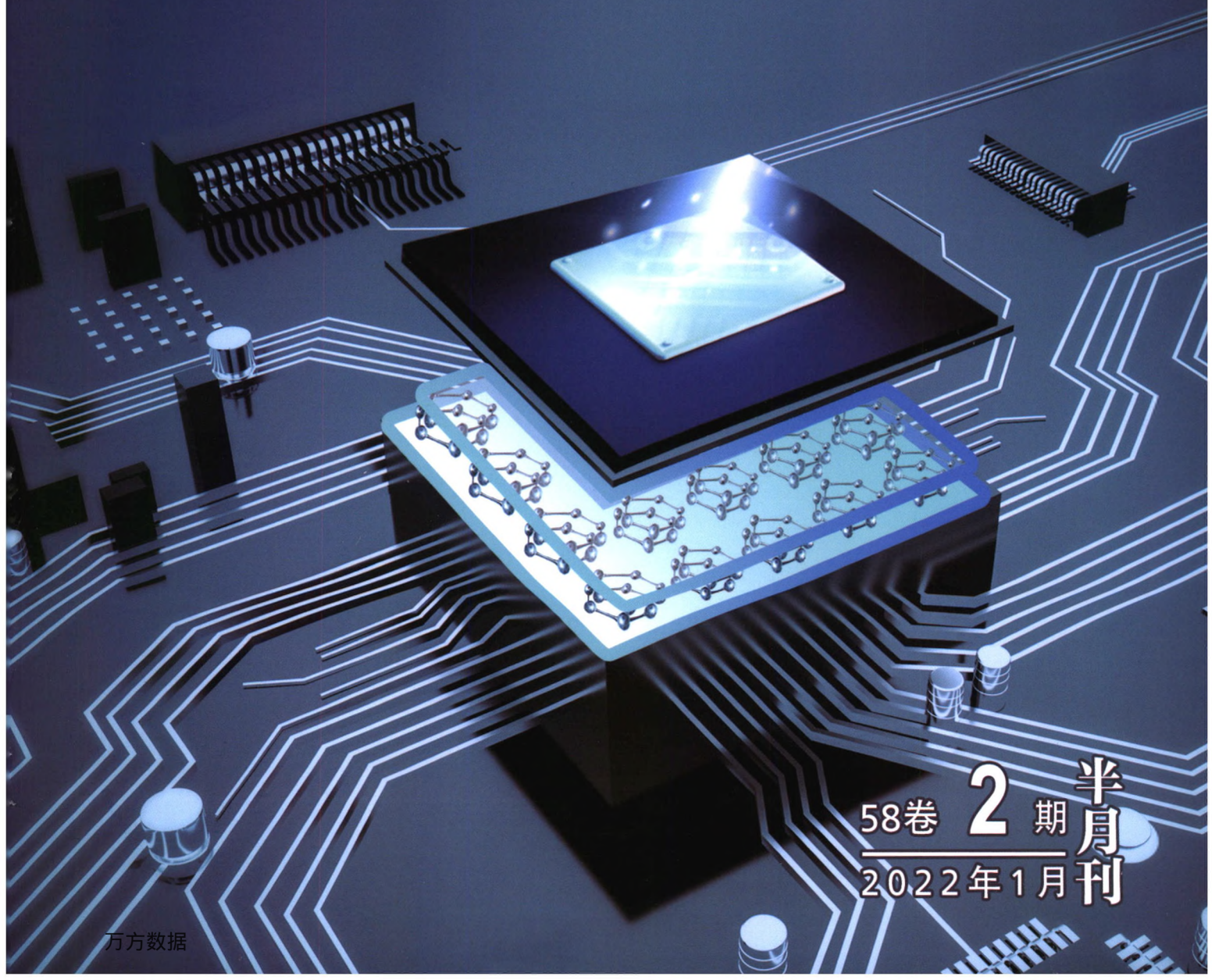
机械工程学报®

JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING

特邀专刊：微纳连接研究新进展

客座主编：邹贵生 田艳红

客座编辑：彭 鹏 刘 磊



58卷 **2** 期 **半月刊**
2022年1月

特邀专刊

微纳连接研究新进展

客座主编：邹贵生 教授（清华大学）
田艳红 教授（哈尔滨工业大学）
客座编辑：彭 鹏 副教授（北京航空航天大学）
刘 磊 副教授（清华大学）
策划编辑：田 旭（《机械工程学报》编辑部）

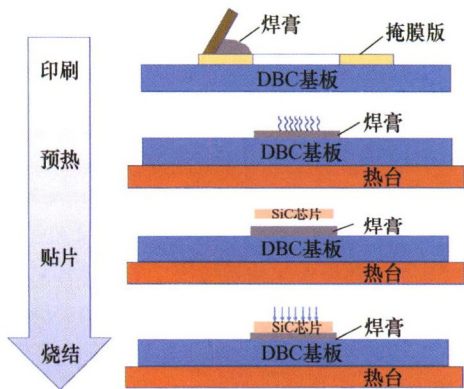
序言

1 序言

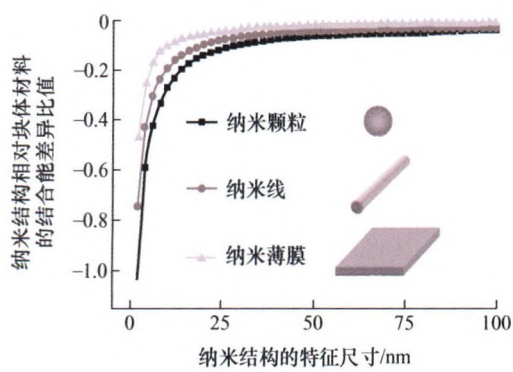
微纳连接新材料

2 纳米颗粒材料作中间层的烧结连接及其封装应用研究进展

贾 强 邹贵生 张宏强 王文淦 邓钟炆 任 辉 刘 磊 彭 鹏 郭 伟



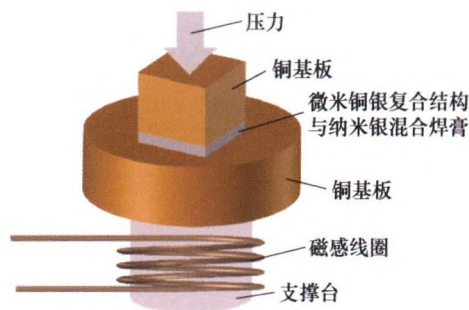
摘要：随着第三代功率半导体器件的发展，以 SiC 为代表的宽禁带半导体芯片在大功率电力电子器件中扮演了越来越重要的角色。然而与传统 Si 芯片匹配的封装材料难以满足其高温服役的要求，成为功率电子器件应用的短板。纳米颗粒材料作中间层用于电子封装能够实现低温连接、高温服役，是目前封装材料的研究热点。本文综述了当前纳米颗粒材料作中间层的存在形式，重点分析单质纳米颗粒烧结连接的优势、影响因素以及局限性，系统阐述了复合纳米颗粒烧结连接的最新进展以及发展趋势，旨在促进纳米颗粒材料作中间层在电子封装中的应用。



摘要：随着结构系统及功能器件的小型化，微小空间下的异质材料高效集成互连成为了精密仪器系统设计与器件开发的迫切需求。为满足高质量、批量化以及绿色环保的微纳制造工艺要求，结合先进纳米薄膜制备工艺得到的非稳态或亚稳态的纳米尺度薄膜材料由于其特殊的尺度效应以及表/界面结构特征，在高精度异质材料互连领域正得到广泛的研究与应用。对不同体系(金属、半导体、氧化物)的结构纳米薄膜中各组元的反应活性或各相的热稳定性进行分析与阐述，并针对所设计的纳米薄膜结构在不同领域如航天、微电子中的异质材料互连中的应用进行综述。此外，由于纳米材料自身极高的反应活性，作为辅助钎料，其在硬质材料及热敏感材料的局域互连中也展现出巨大的应用前景。

26 微米铜银复合结构与纳米银混合连接材料制备与高频感应快速烧结方法研究

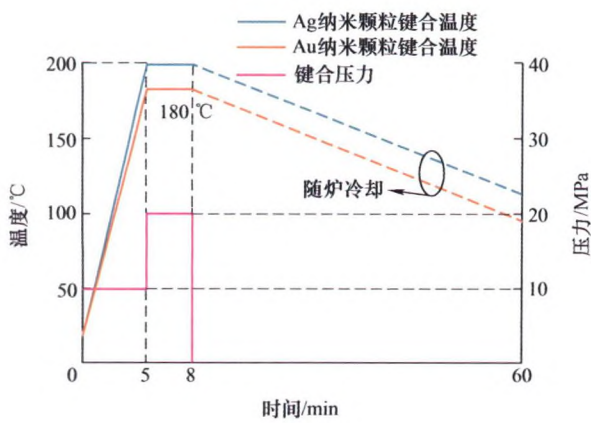
吴卓寰 刘 威 温志成 王一平 田艳红 王春青



摘要：利用置换反应实现了微米铜银复合结构颗粒的制备，在试验中改变反应温度、反应物比例及反应时间从而确定了制备微米铜银复合结构颗粒的最优反应参数。合成了粒径大小均匀，分散性良好的纳米银颗粒，平均粒径为 14.33 nm 左右。通过计算设计了两种颗粒的混合比例，按照该比例制备了微米铜银复合结构与纳米银混合焊膏并制备成三明治结构用于高频感应加热烧结，成功实现了微米铜银复合结构与纳米银混合焊膏对铜-铜基板的连接，并研究了在高频感应加热条件下，功率大小对微观连接界面的影响。试验结果表明，加热功率的增加会使界面的孔隙等缺陷减少，致密性显著提高。加热功率 26 kW 下，烧结时间 15 s 时，剪切强度可达 48 MPa。

34 基于磁控溅射制备金属纳米颗粒的低温键合技术研究

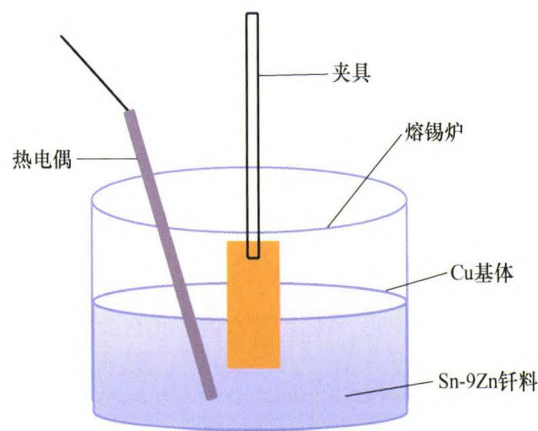
方君鹏 王 谦 蔡 坚 万翰林 宋昌明 郑 凯 周亦康



摘要：三维集成是后摩尔时代异质集成的关键技术路线之一，片间互连是其关键技术。传统的金属热压键合技术由于存在键合温度高和键合时间长的问题，不再适用于三维集成技术的发展需求，新型的具有低温、短时和高可靠性特点的片间互连技术受到广泛关注。提出一种基于磁控溅射制备金属纳米颗粒的低温键合方法。首先采用磁控溅射方法分别进行金属 Ag 和 Au 纳米颗粒的制备，并将获得的金属纳米颗粒作为键合界面的修饰层应用于低温键合试验，实现了键合温度在 200 °C 以内、键合时间为 3 min 的低温短时热压键合。接下来对键合之后的样品进行了剪切强度测试和表征，结果表明采用 Ag 纳米颗粒作为纳米修饰层的键合样品的平均剪切强度超过了 10 MPa，采用 Au 纳米颗粒修饰的键合样品的平均剪切强度超过了 15 MPa，且上述剪切强度都超过了 Cr 和二氧化硅之间的薄膜粘附强度，能够满足后续工艺的要求。此外还分别观测了不同样品的键合界面微观组织形貌，并且据此分析了基于磁控溅射制备金属纳米颗粒的低温键合技术的键合机理。

43 Cu₅Zn₈ 和 Sn/Ag₃Sn/Ag 扩散阻挡层在 Sn/Cu 钎焊互连界面反应中的作用

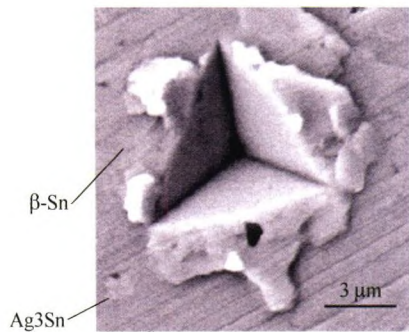
姚金冶 陈祥序 李 花 马海涛 王云鹏 马浩然



摘要：电子器件的微型化对钎焊界面的可靠性提出更高的要求，深入研究钎焊界面金属间化合物 (Intermetallic compound, IMC) 的形貌演变和生长机制具有重要意义。金属 Cu 具有优良的导电导热性能，在微电子封装行业中广泛应用为基体材料。在钎焊回流过程中，Cu 基体与 Sn 钎料发生界面反应生成 IMC，由于 IMC 具有较高脆性，过度生长的 IMC 会严重降低焊接接头的可靠性。为了抑制 IMC 的过度生长，在 Cu 基体表面分别制备 Cu₅Zn₈ 扩散阻挡层和 Sn/Ag₃Sn/Ag 扩散阻挡层。研究在不同钎焊工艺下，纯 Sn 钎料在 Cu 基板、Cu₅Zn₈ 扩散阻挡层/Cu 基板、Sn/Ag₃Sn/Ag 扩散阻挡层/Cu 基板上 IMC 的形貌演变及生长动力学机制，最终试验结果发现 Cu₅Zn₈、Sn/Ag₃Sn/Ag 扩散阻挡层可以抑制 Sn/Cu 钎焊互连界面反应。

50 纳米压痕研究石墨烯增强 Sn-Ag-Cu 钎料焊点的高温蠕变行为

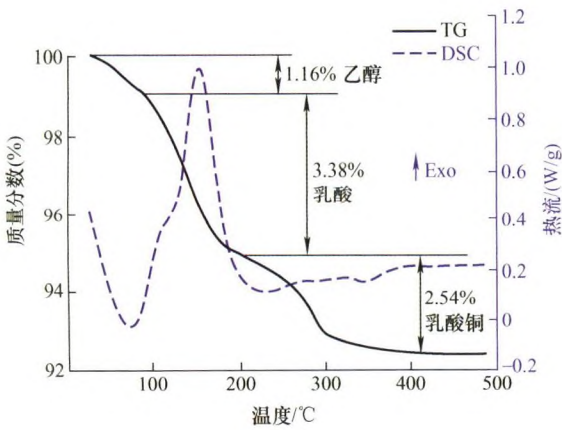
李 元 徐连勇 高 宇 荆洪阳 赵 雷 韩永典



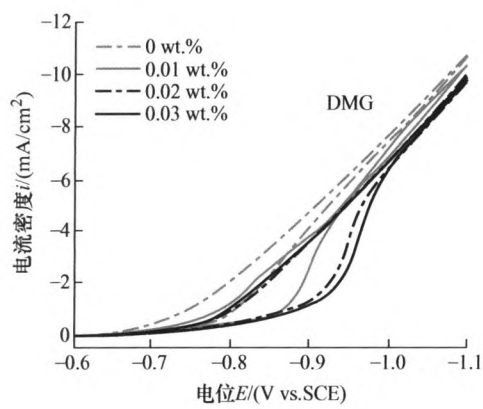
摘要：当前，为应对电子封装产业微型化、高密度化的发展趋势，提高钎料焊点的可靠性，石墨烯增强锡基复合钎料成为研究热点。但相关研究多集中于石墨烯对界面反应及剪切强度的影响，对焊点高温蠕变行为及本构方程的研究较少。为强化传统的 Sn 基钎料，首先通过机械混合的方法制备了石墨烯增强 Sn-Ag-Cu 复合钎料。然后利用纳米压痕技术对复合钎料焊点在高温下的蠕变行为进行研究，并与 Sn-Ag-Cu 焊点进行了对比。试验结果表明，保载阶段，蠕变应力会发生松弛(Δσ)，同时石墨烯可有效减慢焊点的蠕变应变速率，抑制晶界滑移，提高激活能。修正的 Dorn 模型考虑了位错强化、细晶强化、奥罗万强化、载荷传递强化等强化机制以及温度的影响，与纳米压痕得到的蠕变数据较好的吻合，验证了修正模型的有效性。

58 芯片互连用粒径双峰分布纳米铜膏的低温无压烧结纳连接机理和接头可靠性

黄海军 周敏波 吴 雪 张新平

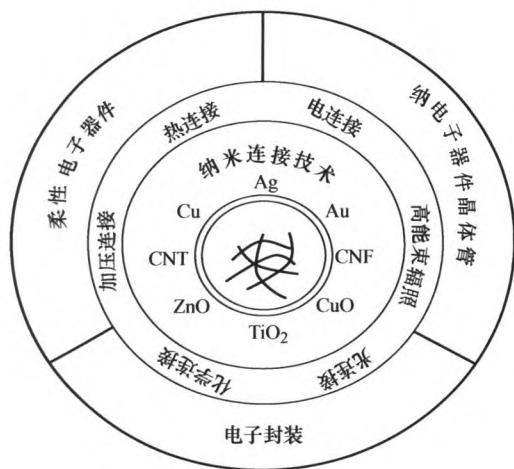


摘要：利用一步化学还原法合成具有粒径双峰分布的铜纳米颗粒，并制备可在低温无压条件下烧结的纳米铜膏。铜纳米颗粒由平均粒径 160 nm 的大颗粒及其被平均粒径 9 nm 小颗粒包围的团聚体构成；采用乳酸基复合包覆剂不仅能有效防止铜颗粒氧化，还对纳米颗粒烧结过程有促进作用。280 ℃ 下无压烧结后的铜膏烧结接头剪切强度高达 65 MPa，究其原因主要是烧结过程中形成的大尺寸块体铜颗粒的强化作用，以及铜膏烧结基体与上、下基板界面间形成了致密无缺陷的牢固冶金互连。铜膏烧结接头的形成主要由“颗粒-颗粒”间纳连接及“颗粒-基板”界面的纳连接而实现，前者以表面活性能高的小尺寸铜纳米颗粒为“桥梁”将大尺寸铜颗粒连接成致密块体铜，而后者借助乳酸铜高温下分解得到的铜纳米颗粒与基板间的互扩散和自扩散最终在界面形成连续且致密的纳连接层。烧结接头在空气中 250 ℃ 时效 1 000 h 后，铜膏烧结基体与界面处虽出现空洞，但仍具有高强度(大于 56 MPa)，表明铜膏烧结接头有较好的抗高温热氧化性能。

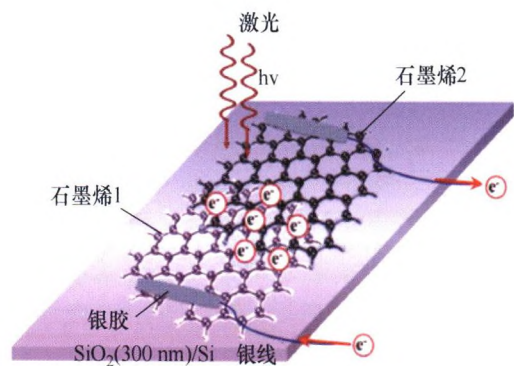


摘要：随着芯片互连尺寸缩小至 10 nm 节点以下，钴(Co)凭借其短电子自由程、优异的抗电迁移和扩散阻挡性能，被提出作为替代铜的新一代互连材料。抑制剂的加入可以实现 Co 互连的电沉积超填充，但同时会造成 Co 电阻率的增加。热处理是改善电性能的常用手段，然而抑制剂和热处理对 Co 电性能的共同影响及机理有待研究。为研究其共同影响机理，评估了丁二酮肟(DMG)、聚乙烯亚胺(PEI)和 2-巯基-5-苯并咪唑磺酸(MBIS)三种抑制剂的电化学行为，电沉积制备了抑制剂作用下的 Co 镀层，表征了热处理前后 Co 的晶体结构、晶粒尺寸和杂质变化。结果表明镀层方阻随着抑制剂浓度的增加而增大。0.02 wt.% DMG、0.001 5 wt.% PEI 和 0.002 wt.% MBIS 具有相似的抑制能力，对应镀层具有 HCP 晶体结构和相似的晶粒尺寸，且 300 ℃热处理后未发生明显变化，镀层的初始方阻和 300 ℃热处理后方阻下降率的大小关系均为 0.02 wt.% DMG>0.001 5 wt.% PEI>0.002 wt.% MBIS，造成该大小差异的主要原因分别是镀层初始杂质含量和热处理后杂质下降量的不同。此研究为业界选择最佳的添加剂及热处理工艺，以生产具备优越电性能的 Co 互连线提供了一定的理论支持。

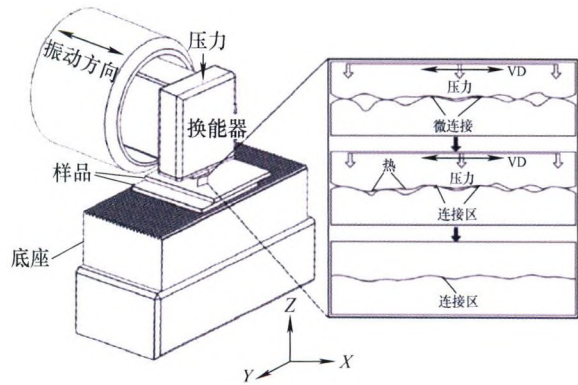
微纳连接新工艺



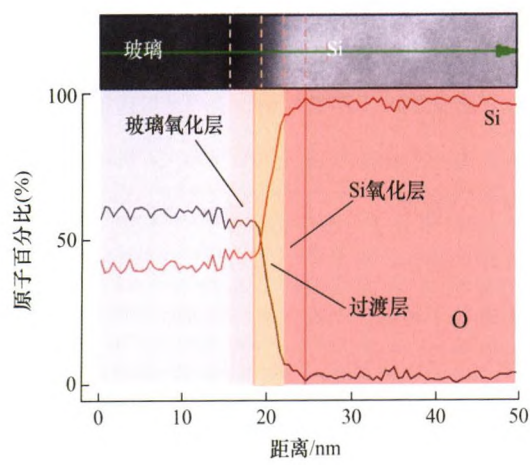
摘要：微纳连接是电子产品制造、封装、组装及功能化过程中的关键技术。纳米线由于独特的光学、电学及热学等特性，在小型化、多功能化的微纳电子器件中的作用日趋显著。因此，关于纳米线互连技术的相关研究已成为学术界和产业界共同的关注热点。与宏观尺度的互连相比，纳米线材料之间的互连在尺寸、结构及要求都具有一定的特殊性，这也催生了各种各样纳米连接方法的诞生与发展。综述了目前金属/非金属纳米线同质、异质连接的研究进展，归纳了常见的纳米线互连方法，如热致连接、光辐照连接、电场辅助连接及高能粒子束连接等方法及互连机制，介绍了其在柔性电子和其他微纳器件封装领域中的应用，并探讨了金属/非金属纳米线连接技术目前存在的问题及发展趋势。



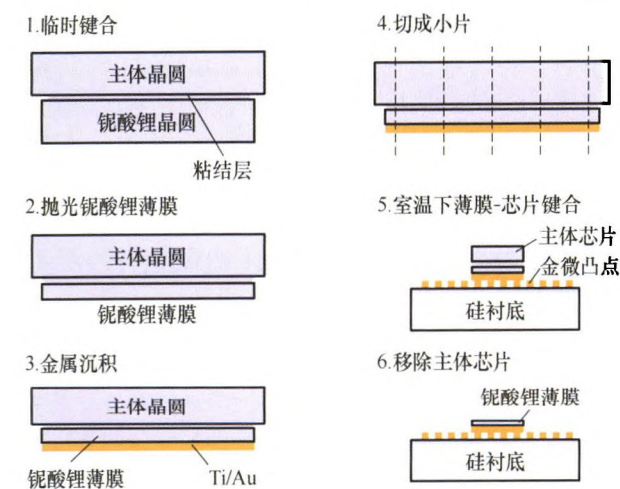
摘要: 随着航空、电子以及能源技术的发展,以低维度纳米材料为功能单元的复杂电子设备和系统趋向于柔性化和微型化,这一过程依赖于纳米材料间的高质量连接。微纳材料自身的尺寸及结构限制使得传统的热退火、机压成型、化学处理和电子束辐照等方法难以在构筑有效连接的同时避免非连接区域的损伤,而激光加工则由于其聚焦光斑尺寸小,单色性好和便于精确控制能量输入等优势得到广泛关注。为阐明激光在微纳连接领域的实际应用意义和潜在应用前景,首先分析超快激光和常规激光在微纳连接形成过程中与材料的瞬态作用机制,在此基础上详细综述了零维纳米颗粒、一维纳米线、二维纳米薄膜以及混合维度材料的激光连接策略,同时介绍了纳米材料连接后获得的网状结构在透明电极中的应用。最后,针对当前激光微纳连接技术存在的不足进行分析,并对今后的发展进行了展望。



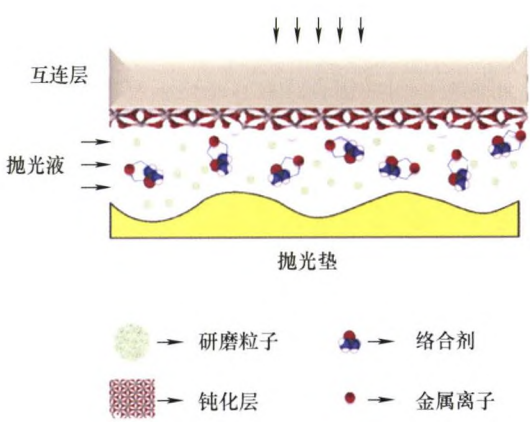
摘要: 新材料与工艺是推动先进电子制造与封装发展的关键,尤其针对高集成度、高温服役和高可靠性等大功率器件的互连难题,开发出面向高端微电子制造关键“卡脖子”技术的材料与工艺显得尤为紧迫。功率超声具有表面清洁、空化与声流等特性,可显著提高界面冶金连接能力,能有效克服传统瞬态液相连接反应时间长与温度高的难点,且能破解 Cu、Al 等金属互连过程中易氧化的痛点问题,并解决了 SiC、Al₂O₃、AlN 等陶瓷基板难润湿与纳米颗粒低温烧结驱动力不足的难题。结合本团队在该领域深耕多年的积累,聚焦功率超声应用于微纳连接方向,从超声固相键合、超声复合钎焊和超声纳米烧结互连等三个方面综述了面向电子制造中功率超声微纳连接技术的原理、方法、特点及实际应用场合,并分别从固相连接中引线键合、室温超声金属连接和超声增材制造等领域,到钎焊连接中超声低中高温软钎焊与超声瞬态液相连接等领域,提出适用于超声微纳连接的新型互连技术。最后,针对第三代半导体中大功率器件封装互连的迫切需求提出了超声纳米烧结连接新方法,并开发出具有高效低温连接高温服役的金属纳米焊膏新型互连材料,且对其接头力学、热学、电学,以及可靠性等进行了全面评估,也进一步总结了功率超声微纳连接技术的研究进展及趋势。



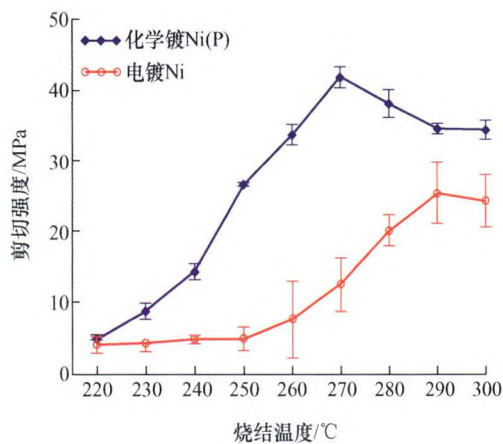
摘要：随着电子及生物医疗元器件朝着微型化、便携式及多功能性的发展，连接(电子领域内常被称为“键合”)已成为材料或结构一体化集成不可或缺的关键环节。表面活化键合避免了传统焊接工艺中的高温，能够在较低温度条件下使热膨胀差异较大的材料或结构实现可靠连接，在微电子、微机电系统、光电子及微流控芯片等制造领域极具应用潜力，其中紫外光作为一种简易高效的表面活化手段近年来备受关注。本文对紫外光活化低温键合相关的研究进展进行综述，主要介绍了紫外光的基本性质，对有机及无机材料基板表面的作用效果，总结了面向微电子、微机电系统和光电子器件制造的紫外光表面活化晶圆键合成果，以及其在微流控器件封接、医用可植入器件制备中的应用实例，最后对该键合方法的未来发展和挑战进行了展望。



摘要：随着半导体技术领域对低温晶圆键合技术的需求不断增长，表面活化键合(Surface activated bonding, SAB)技术开始被广泛研究。与其他键合方式相比，即使在室温下，表面活化键合也能完成牢固的键合，对于常规半导体、金属材料等非常有效。但对于 SiO₂、有机物等材料，标准的表面活化键合并不十分适用，限制了其在特定领域的应用。近年来，研究者们提出两种改进型表面活化室温键合技术，通过在表面活化时或活化后向材料表面沉积一层纳米中间层，将晶圆的直接键合转化为纳米中间层间的键合。在键合机理方面，重点分析了材料的表面活化机制、界面原子成键机制以及环境因素对键合强度的影响等。通过对前期研究的分析总结进一步对比了三种表面活化键合技术的优缺点，期望可以推动表面活化键合技术在半导体技术领域的进一步广泛应用。

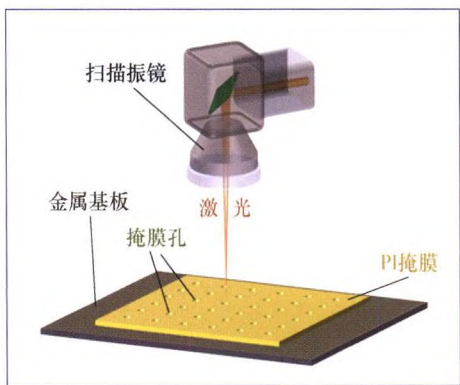


摘要：化学机械平坦化(Chemical mechanical planarization, CMP)是芯片制造中的关键技术，用于实现多种结构表面纳米级别的超精细平坦化。互连层金属和芯片结构中的其他材料性质差异较大，其平坦化过程更加依赖于抛光浆料中的化学组分。协同机理适用于描述金属 CMP 的材料移除过程：抛光浆料中的化学组分对互连层表面进行化学改性，继而在研磨粒子的机械磨削作用下去除。基于此，综述重点介绍了研究研磨粒子微观状态和作用的接触机制和其相关模型的发展；并分别阐述了氧化剂、络合剂和抑制剂等化学组分的作用和金属的反应过程和原理；最后对抛光液组分最新研究进展和发展趋势进行了归纳总结，以期在芯片制造技术发展过程中，对新型浆料的开发提供参考，以满足不同工况条件下所需的材料去除速率，超精细平坦化和超低缺陷的要求。



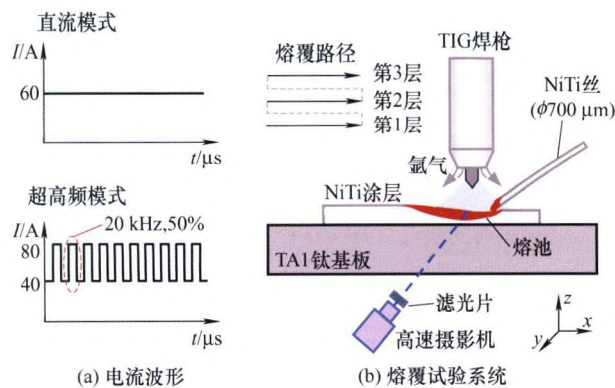
摘要: 化学镀镍(磷)和电镀镍是最常用的两种基板镀镍工艺, 但是目前关于烧结银与这两种镀镍界面互连的对比研究鲜见报道。提出一种在空气中无压烧结银-镍界面互连的工艺方法, 研究烧结温度 220~300 °C 对烧结银与化学镀镍(磷)和电镀镍基板互连强度的影响, 并且对比分析化学镀镍(磷)和电镀镍基板的表面形貌与粗糙度、化学成分、晶体结构, 以及对烧结银-镍界面互连的连接强度和微观形貌的影响等。研究发现, 随着烧结温度的升高, 烧结银与化学镀镍(磷)和电镀镍的连接强度都先增大后降低, 但是化学镀镍(磷)的富磷成分和非晶结构可以加速银-镍扩散和减缓镍的氧化, 烧结银与化学镀镍(磷)的最大连接强度(42 MPa)比电镀镍基板高 17 MPa 左右。

166 纳米银微焊点阵列的超快激光图形化沉积及其芯片封装研究

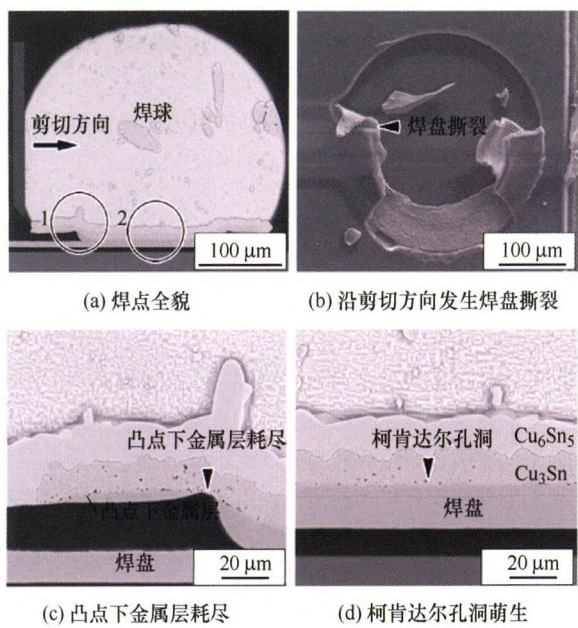


摘要: 随着集成电路芯片封装向小型化、集成化方向的不断发展, 无铅锡基钎料性能已不能满足目前集成电路封装的需求。本文提出了一种脉冲激光图形化沉积纳米金属颗粒制备小尺寸、细节距焊点阵列的工艺, 用于替代集成电路芯片封装中传统锡基焊点。采用图形化沉积的纳米银焊点阵列连接 Si 芯片及覆铜陶瓷(DBC)基板来验证该工艺在集成电路倒装芯片封装中的可行性。结果表明, 采用聚酰亚胺胶带作为掩膜, 可成功沉积出特征尺寸 100 μm 的银焊点阵列, 其最大高度 50 μm 且呈锥形形貌。焊点锥形形貌的主要形成原因是沉积过程中纳米颗粒在掩膜孔内壁积累造成掩膜孔径不断减小及掩膜孔深度阻碍了颗粒在孔边缘的沉积。在 250 °C-3 MPa-10 min 的热压连接参数下, 形成的焊点微观结构呈中心致密、边缘疏松状态。接头剪切强度随焊点沉积高度的增加而增加, 当沉积高度为 50 μm 时, 接头强度达到 20 MPa 以上, 剪切断裂主要发生在银焊点与 DBC 基板的连接界面处, 断裂方式为韧性断裂。

176 NiTi 形状记忆合金电弧熔融涂覆及微连接机理

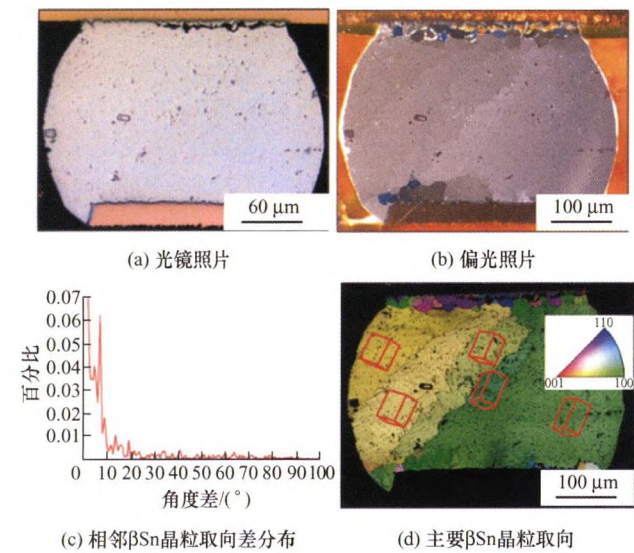


摘要: NiTi 形状记忆合金作为表面涂覆材料, 有利于提高构件的耐磨和抗氧化性能。基于非熔化极氩弧焊(Tungsten inert gas welding, TIG)电弧熔融涂覆技术, 分别采用常规直流、超高频脉冲(Ultra high-frequency pulsed, UHFP)电流两种模式, 在 TA1 纯钛板表面沉积 3 层 NiTi 涂层。基于有限体积法, 利用 FLUENT 建立计算流体力学(Computational fluid dynamics, CFD)仿真模型开展熔融涂覆工艺及微连接机理研究, 模拟对比了两种电流模式下的熔池传热传质、NiTi 熔滴过渡、熔覆涂层及微连接界面的 Ni 元素传输和分布规律, 数值计算和试验结果吻合较好。结果表明, 涂层主要由 NiTi(B19')和 NiTi₂ 相组成, 其中近等原子比的 NiTi 占主导地位; 直流模式下涂层主要为粗糙的球状晶粒, 而超高频模式下涂层为细化的树状晶粒, 且超高频电流有助于熔池振动和元素均匀分布, 并有效提升成形质量。



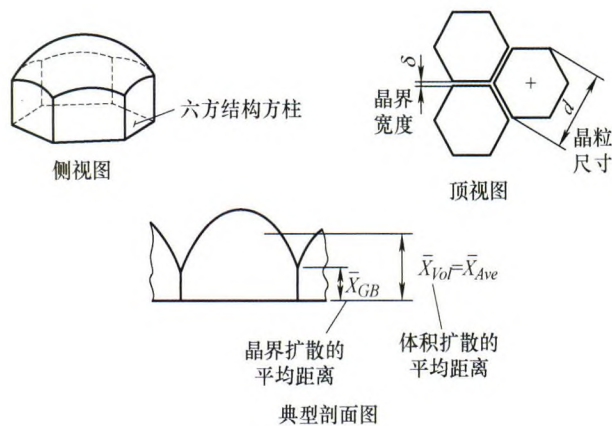
摘要：在先进封装中器件小型化的趋势下，焊点所处的服役环境越加苛刻，这对焊点材料提出了更高的可靠性要求。为保证微小尺寸焊点的可靠性，具有较强扩散阻挡能力的铁镍、铁镍磷和镍钴磷等合金作为新型凸点下金属层(Under bump metallization, UBM)应用。同时，微量元素对焊料合金力学性能、润湿性及界面化合物生长的调节作用也被广泛研究，以指导新型焊料的制备。与此同时，可靠性分析技术发展迅速。高精度的三维 X 射线显微镜(Three dimensional X-ray microscopy, 3D-XRM)和超声波扫描显微镜(Scanning acoustic microscopy, SAM)等先进无损分析技术在界面表征、缺陷快速定位上的得到广泛应用；透射电镜(Transmission electron microscopy, TEM)、电子探针(Electron probe micro-analysis, EPMA)和背散射电子衍射(Electron back-scattered diffraction, EBSD)等前沿技术填补了纳米尺度表征以及未知物相鉴定等技术空白。随着可靠性分析能力的提高，材料在高温、温度循环、机械应力、电流等常见的单场应力下的失效行为和机理研究日趋成熟。由于多物理场耦合的形式更接近小尺寸焊点实际的工作应力状态，其失效行为机理以及寿命模型逐渐成为研究热点。

203 βSn 组织和晶粒取向对焊锡接头可靠性影响机理研究进展



摘要：焊锡接头是集成电路中整合连接不同电子元器件的关键部位，在高电流密度、高低温循环、机械加载等恶劣服役条件下，会发生电迁移、热循环和机械疲劳等失效。由于单个焊锡接头仅包含少数取向随机的 βSn 晶粒且 βSn 具有严重的各向异性，焊锡接头的三类主要失效均受到 βSn 组织和晶粒取向的强烈影响。本文基于 βSn 的各向异性物理特性，深入分析了焊锡接头的电迁移、热循环及机械剪切疲劳失效机理，总结了 βSn 组织和晶粒取向影响各类失效的规律，明确了当 βSn 晶粒的 c 轴平行于电流方向时，焊锡接头的抗电迁移性能最差，而抗热循环性能最佳；但部分研究表明当 βSn 晶粒 c 轴垂直于基板时，焊锡接头的抗热循环性能较差；βSn 组织和晶粒取向对焊锡接头抗机械剪切疲劳性能影响的研究较少，但已有的研究也表明两者之间存在较强关联。鉴于 βSn 组织和晶粒取向对焊锡接头可靠性的强烈影响，本文还梳理了近年来在焊锡接头 βSn 组织和晶粒取向调控方面的研究进展，包括利用异形形核剂、多晶及单晶 Co 基板、磁场及温度梯度等多种调控方法。最后，本文讨论了未来进一步提高焊锡接头可靠性的研究方向。

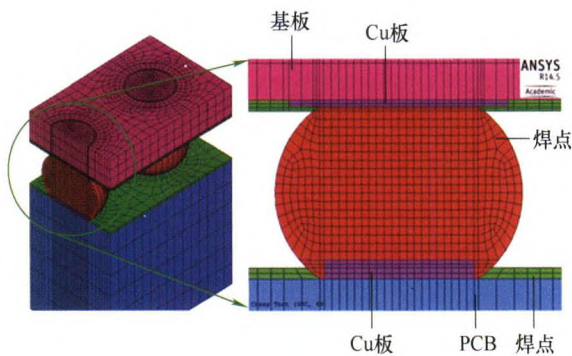
陈捷狮 王佳宁 张志愿 张培磊 于治水 余 春 陆 皓



摘要：随着电子芯片封装尺度高度集成化和功能化，对芯片互连结构的性能需求越来越高。而三维封装互连结构是实现多芯片间系统集成的关键技术之一，微/纳尺度 Cu-Sn 互连结构是实现三维封装互连的重要方向。重点阐述了电子封装中 Cu-Sn 互连结构值得关注的几种界面动力学行为，分别为固-液界面 Cu_6Sn_5 的生长；Cu-Sn 界面层状 IMCs 固态老化；微凸点孔隙型 Cu_3Sn 的生长动力学；1 μm 立柱式 Cu-Sn 界面 IMCs 生长；一维 Cu/Sn 纳米线的界面动力学。此外，随着互连结构尺度的减小，纳米尺度金属间化合物烧结连接等一些有关 Cu-Sn 界面冶金行为也在不断开展相关研究。最后，根据近年来微/纳尺度 Cu-Sn 界面冶金行为领域的研究进展，评述了该领域面临的挑战和展望。旨在厘清尺寸效应下的 Cu-Sn 界面生长动力学的主导机制，对实现三维集成电路的优质互连有着重要意义。

236 极端温度环境 Sn 基焊点本构方程的研究进展

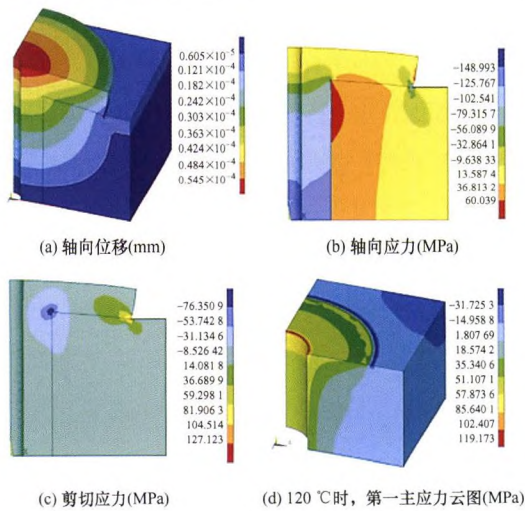
李胜利 牛 飘 杭春进 田艳红 崔 宁 蒋 倩



摘要：焊点在深空探测器的电子系统中承担机械支撑、电气连接和信号通道的作用，电子系统的失效也多由互连焊点的失效引起，这与钎料在不同温度载荷下力学行为和微观组织的变化有着重要的联系。目前焊点主要以 Sn 基钎料为主，且在 $-55\sim 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内根据其力学性能构建黏塑性方程，如 Anand、Garofalo-Arrhenius、Norton、Wiese 模型等。但对小于 $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度环境下的钎料本构方程研究较少。通过对 $-55\sim 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内现有的力学本构模型进行了综述，阐述在不同温度下力学性能和微观组织对焊点可靠性的影响，总结了目前面临的问题和挑战，最后对小于 $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下 Sn 基钎料和焊点的力学本构模型研究进行了初步探索及展望。

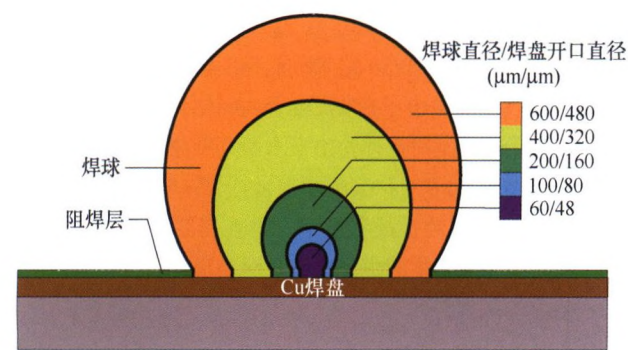
246 玻璃通孔三维互连技术中的应力问题

赵 瑾 李 威 钟 毅 于大全 秦 飞



摘要：玻璃通孔(Through glass via, TGV)三维互连技术由于具有优异的电学、光学特性，良好的力学稳定性和低成本等优势，在三维封装、集成无源器件和光电器件集成方面具有广泛应用前景。然而，玻璃通孔三维互连结构复杂，由多种材料间热膨胀系数不匹配引起的热应力将影响器件和封装的性能和可靠性，针对玻璃通孔三维互连技术的应力和可靠性问题，很多学者开展了相关研究。首先总结了 TGV 三维互连结构中的应力问题，包括 TGV 铜填充热应力理论模型、TGV 孔完全填充或不完全填充铜在应力、局部应力集中引发的热机械可靠性问题。其次，针对 TGV 互连结构应力问题，总结了应力解析和有限元仿真分析进展，明确孔内填充聚合物可缓解残余应力及热应力，具有较高的抗热应力可靠性。最后，指出 TGV 互连应力和可靠性还存在亟待解决的问题。

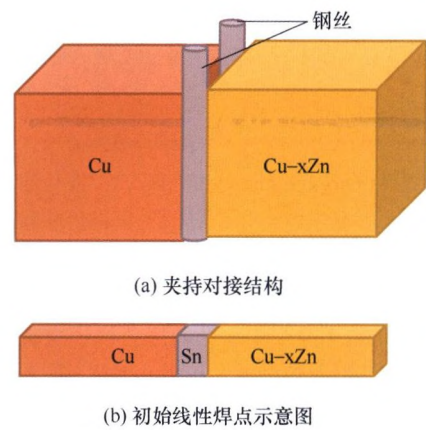
周敏波 赵星飞 陈明强 柯常波 张新平



摘要：针对目前无铅电子封装中主流应用的 Sn3.0Ag0.5Cu 钎料，研究了其直径为 600~60 μm 的焊球在开孔型 Cu 基底(焊盘)上 260 ℃恒温回流不同时间(10~300 s)形成跨尺度凸点结构 Sn3.0Ag0.5Cu/Cu 微互连焊点时界面金属间化合物(IMC)的生长与演化行为，以及跨尺度微焊点的剪切性能与断裂行为。研究结果表明，焊球直径大于 200 μm 时焊点界面 IMC 生长速率随其尺寸减小而增大，而焊球直径小于 200 μm 时焊点界面 IMC 生长速率随焊球直径减小呈减小趋势。对微焊点界面显微组织演化的分析表明，界面 IMC 的粗化生长过程随回流时间延长依次经历了奥斯瓦尔德熟化生长及晶粒吸附与晶界迁移生长两个阶段，且其生长阶段的转变随焊点尺寸减小而更早发生。准静态剪切加载条件下的试验结果表明，微焊点强度随其尺寸减小而增加，而恒温回流时间增加时(10~300 s)同尺寸微焊点的剪切强度并未出现明显变化，但回流时间对大尺寸焊点剪切断裂位置有明显影响。

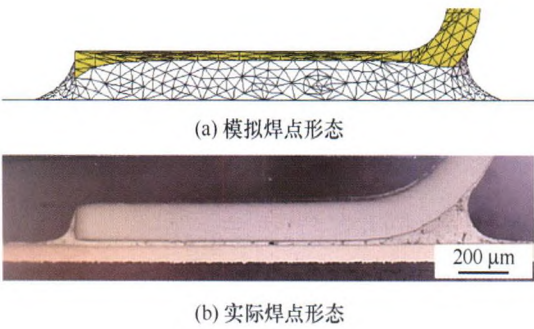
269 Zn 含量对 Cu/Sn/Cu-xZn 微焊点界面反应的影响

刘志斌 乔媛媛 赵 宁



摘要：本文以 Cu/Sn/Cu-xZn(x = 0, 5, 20 wt.%)微焊点为研究对象，探究 Zn 含量对其在等温和温度梯度下回流时液-固界面反应的影响。等温回流时，微焊点两端界面金属间化合物 (Intermetallic compound, IMC)呈对称性生长，且随着 Zn 含量增加，两端界面 IMC 厚度略有减小，表明在 Cu 基体中添加 Zn 对等温回流时界面 IMC 生长的抑制作用不明显。温度梯度下回流时，冷、热两端界面 IMC 呈非对称性生长，且随着 Zn 含量增加，冷端界面 IMC 厚度明显减小，表明添加 Zn 对冷端界面 IMC 生长有显著抑制作用。这是因为，添加 Zn 降低了由热迁移引起的用于冷端界面反应的原子通量。此外发现，由于界面处生成 Cu(Sn, Zn)层，更加有效地阻挡了热端基体溶解，使得 Cu/Sn/Cu-20Zn 微焊点中冷端界面 IMC 生长速率急剧减小。基于界面 IMC 随回流时间的生长规律，分别获得了等温回流和温度梯度下回流时 Cu/Sn/Cu-xZn 微焊点两侧 IMC 的生长动力学。

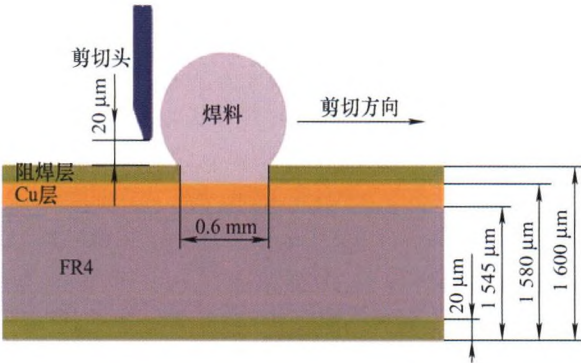
撒子成 王 尚 冯佳运 马竞轩 张 宁 于广良 梁洁玫 田艳红



摘要：针对振动条件下系统级封装(System in package, SiP)器件的振动可靠性问题，利用 ANSYS 软件进行随机振动仿真，并对模型进行参数校正从而获得器件的随机振动疲劳寿命。首先，采用 Surface Evolver 软件对鸥翼形引脚焊点形态进行预测，并将模型数据导入 ANSYS 中完成模型建立；进行不同载荷量级的正弦振动试验，对 SiP 器件模型进行材料参数校正，并对校正后模型进行振动仿真，获得危险点应力数据，结合试验所得的疲劳寿命数据拟合得到材料的 $S-N$ 曲线；最后，通过随机振动仿真分析确定器件危险薄弱点，通过 $S-N$ 曲线和 Dirlik 寿命预测模型，得到 SiP 器件的随机振动可靠性寿命。本文介绍了针对 SiP 器件的随机振动可靠性试验及模拟结果，提出了针对器件寿命的评价通用方法，为器件在整机应用条件下的寿命评价提供理论依据。

284 添加微量 Zn 对 Sn-58Bi/Cu 焊点老化过程中界面演变以及力学性能的影响

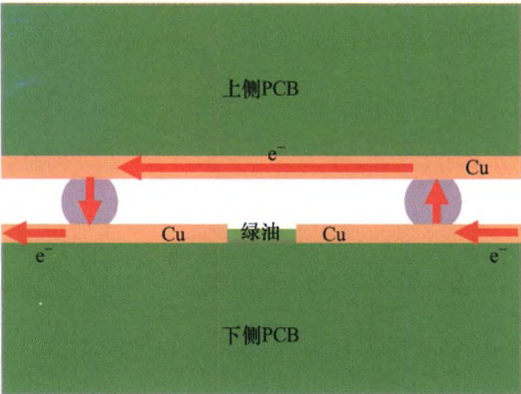
王凤江 何其航



摘要：通过向 Sn-58Bi 焊料中加入微量 Zn 元素，研究了 Sn-58Bi-xZn($x=0,0.2,0.5,1.0$)焊点在老化过程中界面金属间化合物(Intermetallic compounds, IMCs)的生长行为以及对力学性能的影响。研究发现，加入微量 Zn 后，界面 IMCs 由 Cu_6Sn_5 转变为 $Cu_6(Sn, Zn)_5$ 。当 Zn 的添加量达到 1.0wt%时界面 IMCs 为 Cu_5Zn_8 。添加 Zn 显著抑制了界面 Cu_3Sn 在老化过程中的生长。Sn-58Bi-0.5Zn/Cu 焊点界面处 IMCs 在老化过程中出现分层现象，形成 $Cu_6(Sn, Zn)_5/Cu_5Zn_8/Cu_6(Sn, Zn)_5$ 结构。添加微量的 Zn 会降低 Sn-58Bi/Cu 的剪切力，但是随着老化时间的增加，Sn-58Bi-xZn/Cu 焊点的剪切力高于 Sn-58Bi/Cu 焊点，焊点的断裂均由韧性断裂逐渐向脆脆混合断裂模式转变。微量 Zn 的添加有助于提高焊点的长期可靠性。

291 极端热冲击和电流密度耦合 Sn-3.0Ag-0.5Cu 焊点组织演变

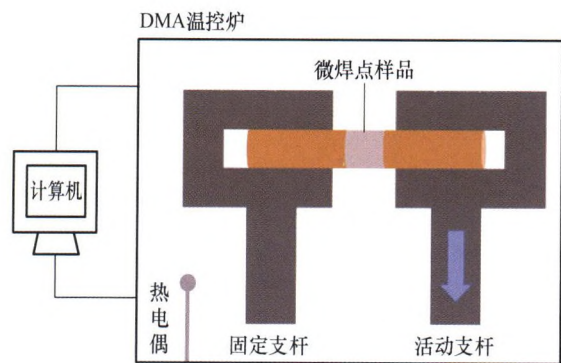
李胜利 任春雄 杭春进 田艳红 王晨曦 崔 宁 蒋 倩



摘要：深空探测环境中电子设备焊点面临极端温度和电场耦合的严峻考验。在-196~150 ℃极端温度热冲击和 1.5×10^4 A/cm² 电流密度的耦合载荷下，对 Sn-3.0Ag-0.5Cu 焊点的微观组织演变规律和电流拥挤效应进行分析，描述焊点微观组织演变及电阻变化之间的联系。试验结果表明，热冲击前期，阳极处 IMC 厚度呈抛物线规律增加，其成分为 Cu_6Sn_5 ；阴极处 IMC 厚度减小且成分也为 Cu_6Sn_5 。随着热冲击次数的增加，电子风力和应力梯度的方向一致的焊点阳极处 IMC 厚度持续增厚，阴极处界面 IMC 不断消融；当二者方向相反时，焊点阳极处界面 IMC 厚度开始减薄，阴极处界面 IMC 厚度明显增加，焊点电阻有所增加，且在焊点的电流输入端还出现了电流集中效应。此外，双层 IMC 之间贯穿焊点的疲劳裂纹导致了焊点失效，焊点的电阻值达到无穷大。

300 Cu/SAC305/Cu 微焊点的剪切蠕变试验及数值模拟

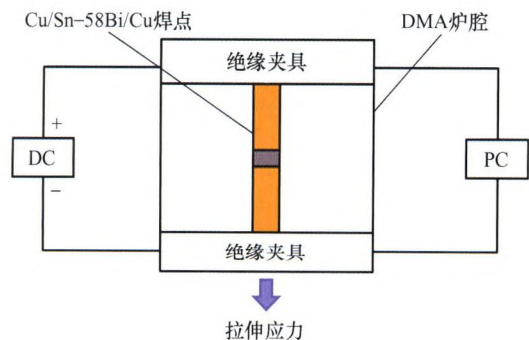
尹立孟 苏子龙 左存果 张中文 姚宗湘 王 刚 王善林 陈玉华



摘要:采用基于动态力学分析仪(DMA Q800, TA-Instruments)的精密蠕变试验,针对直径 400 μm 、高 250 μm 的 Cu/Sn-3.0Ag-0.5Cu/Cu 无铅微尺度焊点,研究了其在 10 MPa 恒定应力和不同温度(100 $^{\circ}\text{C}$ 、110 $^{\circ}\text{C}$ 、120 $^{\circ}\text{C}$)以及 100 $^{\circ}\text{C}$ 恒定温度和不同应力(8 MPa、10 MPa、12 MPa)条件下的剪切蠕变。同时,借助有限元分析软件 ABAQUS 进行了焊点的剪切蠕变数值模拟。试验结果表明,在 10 MPa 下剪切蠕变激活能 Q 为 114.5 kJ/mol, 100 $^{\circ}\text{C}$ 下微焊点剪切蠕变应力指数 n 为 6.12。模拟结果显示,在 10 MPa 下剪切蠕变激活能 Q 为 105.49 kJ/mol, 100 $^{\circ}\text{C}$ 下微焊点剪切蠕变应力指数 n 为 6.67。结合试验和模拟所得的蠕变激活能、应力指数认为,焊点剪切蠕变机制以晶格扩散机制为主。焊点断口形貌显示,剪切蠕变断裂路径穿过钎料基体并靠近 SAC305 钎料/IMC 界面区域,表现为典型韧性断裂。

307 电-热-力耦合载荷下非均匀组织 Cu/Sn-58Bi/Cu 微焊点拉伸力学性能研究

李望云 李兴民 汪 健 梁泾洋 秦红波



摘要:电子封装微焊点往往在电、热、力等多种载荷共同作用下服役,且具有鲜明的组织不均匀特征。研究电-热-力耦合载荷下电流密度和温度对电子封装组织不均匀线型 Cu/Sn-58Bi/Cu 微焊点拉伸力学性能及其尺寸效应的影响。结果表明,较低温度和较低电流密度情况下,随焊点高度降低,Cu 基底对钎料的力学约束增强,焊点拉伸强度提高,断裂发生在钎料体内,呈韧性断裂,与室温无电流情况下的力学行为和断裂模式一致。钎料内 Sn 相与 Bi 相电流密度非均匀分布所致的局部电流拥挤现象使两相间的温度梯度明显增加,因此由热膨胀系数差异所致的相界面应变失配和界面应力增大,致使焊点强度低于室温无电流加载时的值。随着温度和电流密度升高,Sn 相与 Bi 相界面及钎料与 IMC 层界面的应变失配和界面应力加剧,导致焊点拉伸强度进一步下降;同时,断裂位置从钎料基体内逐渐转移至钎料/IMC 层界面处,断裂模式由韧性断裂转为韧-脆混合断裂。

33 第 10 届上银优秀机械博士论文奖——佳作奖

175 第 10 届上银优秀机械博士论文奖——佳作奖

258 第 10 届上银优秀机械博士论文奖——佳作奖

320 第 10 届上银优秀机械博士论文奖——佳作奖

CONTENTS

2	Research Progress in Sintering-bonding with Nanoparticle Materials as Interlayer and Its Packaging Application	JIA Qiang ZOU Guisheng ZHANG Hongqiang WANG Wengan DENG Zhongyang REN Hui LIU Lei PENG Peng GUO Wei
17	Research Progress of Structured Nano Thin-films Based Micro/Nanojoining Technologies	LIN Luchan LIU Lei ZOU Guisheng LI Zhuguo
26	Fabrication of Micron-Cu@Ag and Nano-Ag Particle Connection Material and Study of High Frequency Induction Rapid Sintering Method	WU Zhuohuan LIU Wei WEN Zhicheng WANG Yiping TIAN Yanhong WANG Chunqing
34	Research on Low-temperature Bonding Technology Using Metal Nanoparticles Prepared by Magnetron Sputtering	FANG Junpeng WANG Qian CAI Jian WAN Hanlin SONG Changming ZHENG Kai ZHOU Yikang
43	Effect of Cu₅Zn₈ and Sn/Ag₃Sn/Ag Diffusion Barrier on Interface Reaction of Sn/Cu Soldering	YAO Jinye CHEN Xiangxu LI Hua MA Haitao WANG Yunpeng MA Haoran
50	High Temperature Creep Behavior of Sn-Ag-Cu Solder Joints Reinforced by Graphene via Nanoindentation	LI Yuan XU Lianyong GAO Yu JING Hongyang ZHAO Lei HAN Yongdian
58	Nano-joining Mechanisms and Joint Reliability of Die Attachment Using Bimodal-sized Cu Nanoparticle Paste Capable of Low-temperature Pressureless Sintering	HUANG Haijun ZHOU Minbo WU Xue ZHANG Xinping
66	Effects of Additives and Heat Treatment on the Electrical Properties of Cobalt Interconnect Plating	CHEN Shuhui ZHANG Mengyun TAN Lingyue LI Ming HANG Tao

76 Recent Progress of Metal/Nonmetal Nanowire Joining Technology and Its Applications
ZHANG He WANG Shang FENG Jiayun MA Jingxuan HU Xuanyi FENG Yan TIAN Yanhong

88 Research Advances of Laser-induced Micro-nano Joining Technology
WANG Lianfu DING Ye WANG Genwang GUAN Yanchao WANG Yang YANG Lijun

100 Review of Power Ultrasonic Micro-nano Joining Technology for Electronic Manufacturing
ZHANG Wenwu PAN Hao MA Qiuchen LI Mingyu JI Hongjun

122 Research Progress on Ultraviolet Activated Low-temperature Bonding
WANG Chenxi QI Xiaoyun FANG Hui KANG Qiushi ZHOU Shicheng XU Jikai
TIAN Yanhong

136 Research Progress of Surface Activated Bonding at Room Temperature
ZHANG Hongze TIAN Ye MENG Ying MU Fengwen WANG Xinhua LIU Xinyu

**147 Research Progress of Material Removal Mechanism in Chemical Mechanical Planarization
for Metal Interconnection Layer of Chips**
HANG Tao CHANG Pengfei LI Ming

**159 Study on Interfacial Bonding between Pressureless Sintered Silver with Electroless-plated
Nickel (Phosphorus) and Electro-plated Nickel Metallization**
WANG Meiyu MEI Yunhui LI Xin

**166 Patterning Deposition of Nano-silver Micro Bumps Array by Ultrafast Laser and Its Chip
Packaging Research**
WU Yongchao WANG Shuaiqi GUO Wei LIU Lei ZOU Guisheng PENG Peng

176 Arc-fused Coating Process and Micro-joining Mechanism of NiTi Shape Memory Alloys
KE Wenchao CONG Baoqiang QI Zewu AO Sansan PANG Bowen GUO Wei PENG Bei
ZENG Zhi

**185 Research Progress on the Reliability of Solder Joint for Advanced Microelectronic
Packaging**
GAO Liyin LI Caifu LIU Zhiquan SUN Rong

**203 Research Progress on the Influence Mechanisms of β Sn Structure and Grain Orientation
on the Reliabilities of Solder Joints**
LI Ce WANG Bingguang CHANG Xufeng MA Zhaolong CHENG Xingwang

223 Advances in Metallurgical Behavior of Micro/nano-scale Cu-Sn Interface
CHEN Jieshi WANG Jianing ZHANG Zhiyuan ZHANG Peilei YU Zhishui YU Chun LU Hao

236 Research Progresses on Reliability of Sn-based Solder Joints in Extreme Temperature Environment
LI Shengli NIU Piao HANG Chunjin TIAN Yanhong CUI Ning JIANG Qian

246 Stress Issues in 3D Interconnect Technology Using Through Glass Vias
ZHAO Jin LI Wei ZHONG Yi YU Daquan QIN Fei

259 Size Effects of Growth and Evolution of Interfacial Intermetallic Compound and the Mechanical Behavior of Bump Structure Sn3.0Ag0.5Cu/Cu Cross-scale Joints in Electronic Packages
ZHOU Minbo ZHAO Xingfei CHEN Mingqiang KE Changbo ZHANG Xinping

269 Effect of Zn Content on Interfacial Reactions of Cu/Sn/Cu-xZn Micro Solder Joints
LIU Zhibin QIAO Yuanyuan ZHAO Ning

276 Simulation of SiP Solder Joint Geometry and Random Vibration Reliability Prediction
SA Zicheng WANG Shang FENG Jiayun MA Jingxuan ZHANG Ning YU Guangliang LIANG Jiemei TIAN Yanhong

284 Effect of Trace Zn Addition on Interfacial Evolution and Mechanical Properties of Sn-58Bi/Cu Solder Joints during Aging
WANG Fengjiang HE Qihang

291 Microstructure Evolution of Sn-3.0Ag-0.5Cu Solder Joints under Extreme Temperature Changes and Current Stressing
LI Shengli REN Chunxiong HANG Chunjin TIAN Yanhong WANG Chenxi CUI Ning JIANG Qian

300 Experiment and Numerical Simulation of Shear Creep of Cu/SAC305/Cu Microscale Solder Joints
YIN Limeng SU Zilong ZUO Cunguo ZHANG Zhongwen YAO Zongxiang WANG Gang WANG Shanlin CHEN Yuhua

307 Tensile Performance of Inhomogeneous Microscale Cu/Sn-58Bi/Cu Solder Joints under Electro-thermo-mechanical Coupled Loads
LI Wangyun LI Xingmin WANG Jian LIANG Jingyang QIN Hongbo

《机械工程学报》第十一届编委会

名誉主任

钟群鹏 (院士) 路甬祥 (院士) 潘际銮 (院士)

名誉委员

王玉明 (院士) 石治平 (研高) 叶声华 (院士) 宁汝新 (教授) 过增元 (院士) 刘大响 (院士)
刘友梅 (院士) 刘宏民 (教授) 李圣怡 (教授) 周祖德 (教授) 胡正寰 (院士) 柳百成 (院士)
钟 掘 (院士) 闻邦椿 (院士) 耿荣生 (教授) 徐金梧 (教授) 徐滨士 (院士) 熊有伦 (院士)

主 任

陈学东 (院士)

副 主 任

王国彪 (教授) 邓宗全 (院士) 李 奇 (编审) 陈超志 (教授级高工) 邵新宇 (院士)
黄 田 (教授) 黄庆学 (院士)

国内委员

丁 汉 (院士) 王 雪 (教授) 王田苗 (教授) 王华明 (院士) 王庆丰 (教授) 王时龙 (教授)
王树新 (教授) 王海斗 (教授) 王润孝 (教授) 王耀南 (院士) 孔祥东 (教授) 卢秉恒 (院士)
史玉升 (教授) 冯吉才 (教授) 权 龙 (教授) 曲兴华 (教授) 朱 胜 (教授) 朱 荻 (院士)
朱向阳 (教授) 华 林 (教授) 刘 强 (教授) 刘少军 (教授) 刘军山 (研究员) 刘志军 (教授)
刘辛军 (教授) 刘检华 (教授) 刘雪峰 (教授) 刘献礼 (教授) 刘德顺 (教授) 孙 伟 (教授)
孙汉旭 (教授) 孙逢春 (院士) 严新平 (院士) 杜 雪 (教授) 杜朝辉 (教授) 李大勇 (教授)
李荣德 (教授) 李涤尘 (教授) 杨永强 (教授) 杨华勇 (院士) 杨兆军 (教授) 杨绍普 (教授)
何存富 (教授) 沈功田 (研究员) 张 峥 (教授) 张义民 (教授) 张卫红 (教授) 张立军 (教授)
张宪民 (教授) 陈 新 (教授) 陈文华 (教授) 陈兵奎 (研究员) 陈雪峰 (教授) 苑世剑 (教授)
苑伟政 (教授) 范志超 (研究员) 林 京 (教授) 林 峰 (教授) 林忠钦 (院士) 周仲荣 (教授)
周华民 (教授) 单忠德 (院士) 项昌乐 (院士) 赵 杰 (教授) 赵 继 (教授) 赵 韩 (教授)
赵丁选 (教授) 赵宏伟 (教授) 赵国群 (教授) 柯映林 (教授) 钟志华 (院士) 段吉安 (教授)
段宝岩 (院士) 姜 澜 (教授) 洪 军 (教授) 官声凯 (院士) 姚建华 (教授) 姚振强 (教授)
袁巨龙 (教授) 袁寿其 (教授) 都 东 (教授) 贾振元 (院士) 夏长亮 (院士) 钱林茂 (教授)
徐西鹏 (教授) 殷国栋 (教授) 高金吉 (院士) 郭万林 (院士) 郭东明 (院士) 涂善东 (院士)
陶 飞 (教授) 黄卫东 (教授) 黄传真 (教授) 黄明辉 (教授) 梅雪松 (教授) 彭 艳 (教授)
彭芳瑜 (教授) 葛世荣 (教授) 韩 旭 (教授) 焦宗夏 (教授) 温激鸿 (研究员) 谢建新 (院士)
雒建斌 (院士) 廖维新 (教授) 谭建荣 (院士) 翟婉明 (院士) 熊蔡华 (教授) 融亦鸣 (教授)
戴一帆 (教授)

国际委员

Bi Zhang (美国) Denis Cavallucci (法国) Dong-Pu Cao (英国)
Duc Truong Pham (英国) Erhan Budak (土耳其) Guang-Bo Hao (爱尔兰)
Gui-Yun Tian (英国) Hai-Jun Su (美国) Han Huang (澳大利亚)
Hong-Chao Zhang (美国) Jian-Sheng Dai (英国) Jie (Peter) Liu (加拿大)
Jin Wang (英国) Jorge Angeles (加拿大) Jun Wang (澳大利亚)
Kai Cheng (英国) Kazushi Sanada (日本) Lian-Xiang Yang (美国)
Li-Hui Wang (瑞典) Marco Ceccarelli (意大利) Ming-Jian Zuo (加拿大)
S.S. Park (加拿大) Shao-Ping Bai (丹麦) Shin Usuki (日本)
Tamás Insperger (匈牙利) Wei Gao (日本) Wei-Dong Li (英国)
Wei-Ming Shen (加拿大) Xian-Wen Kong (英国) Xiao-Ping Du (美国)
Xi-Chun Luo (英国) Xu-Dong Zhao (英国) Xun Chen (英国)
Y. Lawrence Yao (美国) Yan Jin (英国) Ye-Hwa Chen (美国)
Yong Huang (美国) Yong-Bo Deng (德国) Yu-Chun Xu (英国)
Zhao-Jie Ju (英国)

