

# 国家自然科学奖推荐项目

## 一、项目名称

基于绿色制造的先进微互连技术基础研究

## 二、推荐单位意见

该项目组在国家发展规划纲要指引下深入开展了基于绿色制造的先进微互连技术理论、材料与工艺的基础研究，先后获得国家科技支撑计划课题，国家自然科学基金重点项目、国际合作与交流项目、面上项目，中国航天科技专项项目，教育部优秀人才等 24 项国家及省部级项目资助，历时 16 年，形成了先进微互连技术相关理论体系，成功应用并解决了国内重要电子制造公司微互连制造中的技术难题。

该项目取得以下创新性研究成果：

1) 原创性建立了浓度梯度控制的液-固界面反应理论模型，揭示了电子封装无铅微焊点在多因素强交互耦合作用下界面反应的本质与规律性，诠释了经典“熟化理论”模型无法解释的微米级焊点凸显的尺寸效应现象；2) 基于团簇结构模型揭示了微合金化在电子封装互连工艺过程中对润湿性、界面强度、抗氧化性等的作用机制，建立了评价无铅钎料合金与互连结构关键力学变形和损伤行为的普适性的蠕变本构关系理论模型和疲劳裂纹扩展关联方程式；3) 阐明了微凸点界面特性、物质迁移、交互作用对无铅微互连整体结构可靠性的影响规律，揭示了微小尺度无铅焊点在电、热、力等多场耦合作用下的失效模式与机理。

该项目成果在本研究领域国际权威学术期刊发表 SCI 论文 148 篇，EI 论文 240 篇，8 篇代表性论文 SCI 他人引用超过 700 次，单篇论文最高 SCI 他引 295 次。已获授权国家发明专利 18 项，形成了自主知识产权的系列无铅钎料合金产品并已实现产业化。本项目成果曾获得 2014 年度中国材料研究学会科学技术一等奖(基础研究类)。

推荐该项目为国家自然科学奖二等奖。

## 三、项目简介

本项目属于先进制造领域，是机械、材料、电子、冶金等学科的交叉。

电子封装微互连技术是先进制造的重要组成部分，微型化发展趋势使互连尺度持续减小从而带来微焊点的尺寸效应，同时全球环保 RoHS 指令（绿色制造）的强制要求导致互连材料体系升级换代。尺寸效应与绿色制造对微互连工艺、互连（封装）结构的力学行为及系统可靠性的影响成为亟需解决的关键科学问题。本项目在国家科技支撑计划、国家自然科学基金重点项目等资助下，系统深入研究并揭示了基于绿色制造的先进微互连技术涉及的新现象及相关原理，形成了先进微互连技术的相关理论体系，取得了系列原创性理论成果，提升了行业技术水平。

主要科学发现：

1) 原创性建立了浓度梯度控制的液-固界面反应理论模型，揭示了电子封装无铅微焊点在多因素强交互耦合作用下界面反应的本质与规律性，诠释了经典“熟化理论”模型无法解释的微米级焊点凸显的尺寸效应现象，实现了微小尺度无铅封装制造互连工艺与结构的优化设计。

2) 基于团簇结构模型揭示了微合金化在电子封装互连工艺过程中对润湿性、界面强度、抗氧化性等的作用机制，建立了评价无铅钎料合金与互连结构关键力学变形和损伤行为的普适性的蠕变本构关系理论模型和疲劳裂纹扩展关联方程式，实现了高性能、微互连材料与结构的优化设计。

3) 阐明了微凸点界面特性、物质迁移、交互作用对无铅微互连整体结构可靠性的影响规律，揭示了微小尺度无铅焊点在电、热、力等多场耦合作用下的失效模式与机理，建立了无铅焊点可靠性预测方程与模型，为微小尺度无铅互连结构的优化设计提供理论指导。

在本领域权威期刊 *Mat Sci Eng R* 等发表 SCI 论文 148 篇，EI 论文 240 篇，8 篇代表性论文 SCI 他引超过 700 次，得到国内外同行的广泛关注和正面引用。获授权发明专利 18 项，自主知识产权的无铅钎料产品已产业化。发表在 *Mat Sci Eng R* 2004 (IF=24.652) 上含微量稀土元素无铅钎料的研究论文单篇 SCI 他引 295 次，引领了国际上相关的基础研究并丰富了研究内涵；美国工程院院士 CP Wong 教授主编的《Advanced Flip Chip Packaging (先进倒装芯片封装)》书中引用并肯定了该项目界面反应理论模型的正确性；美国工程院院士 J. Li 教授详细引用并阐述了无铅钎料蠕变本构关系理论模型的创新性成果，评价该理论模型具有普适性；疲劳损伤模型的成果获 Emerald 国际学术出版社颁发的 2003 年度最佳学术论文奖。上述理论成果指导了电子制造微互连工艺、成分与结构的优化设计，成功解决了微互连制造中尺寸效应带来的技术难题并在航天、军工、通信等领域的关键工程项目上获得成功应用。

## 四、客观评价

### 1. 重要科学发现一：微互连制造工艺中界面反应理论模型

美国工程院院士、佐治亚理工学院 Wong 教授于 2013 年主编的《Advanced Flip Chip Packaging (先进倒装芯片封装)》中第 11 章“倒装芯片凸点中的界面反应与电迁移”由 KN Tu 教授（“熟化理论”模型建立者）撰写，引用评价了本项目的观点：“...那么溶解对界面反应的作用是特别重要的”，肯定了本项目无铅界面反应理论模型的正确性。美国 Electron Comp Tech Conf (ECTC, 电子元器件及技术会议) 是全球电子封装技术领域规模最大且最顶级的国际学术会议。新加坡国立大学 Zeng 教授在 2011 年 ECTC 会议上关于 3D 封装无铅微凸点的论文 [ECTC, 100, 2011] 中正面引用本项目界面反应的研究成果：“...这归因于...钎焊过程中  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  晶粒随凸点尺寸减小而增加，这一尺寸效应现象已被黄报道”。英国 BSI 委员会主席、IEC 与 IPC 委员会委员、英国国家物理实验室 Hunt 主任在关于研发一种评价钎焊参数新方法的论文 [Solder Surf MT2009, 24] 中引用了本项目界面反应理论观点作为其分析的依据：“金属间化合物对 Cu 的溶解起主要作用， $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  晶粒粗化则晶界数目减少，从而减少了 Cu 原子的扩散通道[黄]”。

液-固界面反应理论模型工程应用成功案例：1) 解决了某军工项目单晶硅与 XX 钢高强度界面连接的关键技术难题，为军工项目的完成做出重要贡献；2) 科学指导了中国航天宇航空间站、货运飞船使用的关键核心器件—600 万门级倒装芯片陶封器件的芯片互连凸点整体结构设计方案与焊接工艺研发，为航天国防任务的顺利进行提供了重要支持。

### 2. 重要科学发现二：绿色无铅合金成分设计、力学变形与损伤机理模型

发表在 [Mat Sci Eng R 2004, 1, IF=24.652] 上关于含稀土元素无铅钎料性能的综

述性论文 SCI 他引达 295 次，正面引用来自美国密歇根州立大学、英国诺丁汉大学、芬兰赫尔辛基大学等国外多家知名研究机构，充分体现出在国际学术界的影响力。日本大阪大学 Matsumoto 教授在关于电子封装钎焊润湿性的综述性论文[Annu Rev Mater Res 2008, 251, IF=11.854]中肯定了本项目添加稀土元素明显改善 Sn-9Zn 钎料在 Cu 等基板上润湿性的工作，并认可“**钎料与钎剂界面吸附 RE 元素可以降低界面能，从而改善润湿性**”的观点；印度卡纳塔克邦国家技术研究所 Prabhu 教授在[Adv Colloid Inter Sci 2007, 61, IF=7.776]中对我们论文中稀土元素对无铅钎料润湿性的提高作用进行正面引用。

美国工程院院士 James Li 教授 2007 年发表在[J Mater Sci: Mater Electron 2007, 191]的综述性论文中详细介绍并正面引用了本项目 Sn 基无铅钎料蠕变变形机理模型，认为蠕变本构关系理论模型是焊点可靠性评价和寿命预测的重要理论基础。美国海军研究院 Dutta 教授连续在[Mater Sci Eng A2004, 401]、[J Electron Mater 2008, 347]和[JOM 2009, 29]中大篇幅引用本项目关于 Sn-Ag 无铅共晶合金蠕变变形机理中位错、背应力与激活能的数据与结论。2013 年瑞士洛桑联邦理工学院 Cugnoni 教授在[Acta Mater2013, 103,IF=4.465]论文中引用了我们建立的弥散强化型无铅钎料蠕变变形机理模型作为其分析的主要依据。美国圣地亚国家重点实验室 SMT 主席 Vianco 教授在[J Electron Mater 2004, 1389]中对我们提出的门槛应力的概念和蠕变数据进行了正面引用和分析。**疲劳裂纹扩展理论模型于 2003 年获得国际学术出版社 Emerald 颁发的年度最佳学术论文奖。**美国伊利诺斯大学的 Shang 教授连续在[J Electron Mater 2005, 62]和[J Mater Sci: Mater Electron2007, 211]中多次引用，并在[J Mater Sci: Mater Electron 2007, 211]关于 Sn 基钎料疲劳性能的综述性论文中大篇幅引用了疲劳模型。仅蠕变变形机理与疲劳损伤机理的论文 SCI 他引达 225 次。

### 3. 重要科学发现三：无铅微互连可靠性

美国 Amkor 公司是全球半导体封装与测试领先者，高级产品开发部总监 Syed 连续正面引用了本项目的工作。2010 年他在新加坡 Electron Pack Tech Conf (EPTC) 国际会议上关于倒装芯片和 3D IC 芯片互连中影响电迁移因素的论文[EPTC 2010, 538]中正面引用申请人的研究结果：“...这种情况下将电阻增加作为失效判据可能会得出错误的结论。而这种失效判据对微凸点( $\mu$ -bump)的影响更大，这已得到内部测试证实，并且已被黄报道”；2011 年他在美国 ECTC 国际会议上关于 Cu 柱和微凸点可靠性的论文[ECTC 2011, 332]中正面引用了本项目的研究工作：“电阻初始变化归因于凸点钎料合金转变为界面金属间化合物，而不应归因于电迁移损伤，已在 Cu-Solder-Cu 微凸点研究中已观察到相同的现象[黄]”。美国 IBM 公司 Watson 研究中心 Wright 研究员发表在美国 ECTC 国际会议关于微凸点电迁移可靠性的论文[ECTC2012, 590 和 ECTC 2012, 1278]中正面引用本项目工作：“微凸点的失效模式从根本上不同于标准的 C4 凸点，特别是当微凸点合金全部或几乎全部与互连基体反应生成金属间化合物”，“芯片侧界面经过两次回流，而底部界面经历一次回流，在经历较高温度和较长时间反应后，整个凸点将转变为金属间化合物”。

无铅微互连可靠性研究成果工程应用成功案例：指导了华为公司在高密度无铅产品无铅合金选用、PCB 表面处理设计、电迁移设计方面的技术决策，已在华为 ONT 产品上得到应用并实现量产（年产值过亿元）。

本领域顶级的国际学术会议论文奖：2005 年新加坡 EPTC 电子封装国际会议上题目为“50 $\mu$ m 倒装芯片无铅钎料凸点失效机理分析”的大会报告荣获唯一“最优秀论文奖”。2012 年美国 ECTC 国际会议上题目为“无铅微凸点电迁移过程中的交互作用机制”的大会口头报告获得“演讲者突出贡献奖”。

## 五、代表性论文专著目录

序号	论文专著 名称/刊名 /作者	影响因子	年卷页码 (xx 年 xx 卷 xx 页)	发表时间 年月 日	通讯 作者	第一 作者	国内作 者	SCI 他引 次数	他引总 次数	知识产 权是否 归国内 所有
1	Properties of lead-free solder alloys with rare earth element additions / Materials Science & Engineering R-Reports / Wu C M L, Yu D Q, Law C M T, Wang L	<b>24.652</b>	2004 年 44 卷 1-44 页	2004 年 4 月	胡志文	胡志文	胡志文, 于大全, 罗志文, 王来	295		是
2	Role of Cu in dissolution kinetics of Cu metallization in molten Sn-based solders / Applied Physics Letters / Huang M L, Loehert, Ostmann A, Reichl H	<b>3.142</b>	2005 年 86 卷 181908	2005 年 5 月	黄明亮	黄明亮	黄明亮	34		是
3	Creep behavior of eutectic Sn-Ag lead-free solder alloy / Journal of Materials Research / Huang M L, Wang L, Wu C M L	<b>1.579</b>	2002 年 17 卷 2897-2903 页	2002 年 11 月	胡志文	黄明亮	黄明亮, 王来,胡 志文	47		是
4	Improvement on the microstructure stability, mechanical and wetting properties of Sn-Ag-Cu lead-free solder with the addition of rare earth elements / Journal of Alloys and Compounds / Yu D Q, Zhao J, Wang L	<b>3.014</b>	2004 年 376 卷 170-175 页	2004 年 8 月	王来	于大全	于大全, 赵杰,王 来	115		是

5	Improvement of wettability and tensile property in Sn-Ag-RE lead-free solder alloy / Materials Letters / Wang L, Yu DQ, Zhao J, Huang ML	2.437	2002 年 56 卷 1039-1042 页	2002 年 11 月	赵杰	王来	王来, 于大全, 赵杰, 黄明亮	45		是
6	Microstructural evolution of Sn-9Zn-3Bi solder/Cu joint during long-term aging at 170 degrees C / Journal of Alloys and Compounds / Duan L L, Yu D Q, Han S Q, Ma H T, Wang L	3.014	2004 年 381 卷 202-207 页	2004 年 11 月	王来	段 莉 蕾	段莉蕾, 于大全, 韩双起, 马海涛, 王来	38		是
7	The properties of Sn-9Zn lead-free solder alloys doped with trace rare earth elements / Journal of Electronic Materials / Wu C M L, Yu D Q, Law C M T, Wang L	1.491	2002 年 31 卷 921-927 页	2002 年 9 月	胡 志 文	胡 志 文	胡志文, 于大全, 罗志文, 王来	66		是
8	The wettability and microstructure of Sn-Zn-RE alloys / Journal of Electronic Materials / Wu C M L, Law C M T, Yu D Q, Wang L	1.491	2003 年 32 卷 63-69 页	2003 年 2 月	胡 志 文	胡 志 文	胡志文, 罗志文, 于大全, 王来	63		是
合 计								703		

## 六、主要完成人情况表

姓名	技术职称	工作单位	完成单位	对本项目技术创造性贡献	曾获国家科技奖励情况	排名
黄明亮	教授	大连理工大学	大连理工大学	原创性建立了浓度梯度控制的界面反应理论模型，阐明了经典“熟化理论”模型无法解释的尺寸效应现象；提出并建立了由基体 Sn 的位错管道扩散机制控制的无铅钎料合金蠕变本构关系理论模型；揭示了微小尺度无铅焊点在电、热、力等多场耦合作用下的可靠性物理，建立了基于无铅焊点失效机理的可靠性预测方程与模型。	无	1
胡志文	教授	香港城市大学	香港城市大学	在力学行为与损伤、无铅钎料合金成分设计和界面反应理论方面取得突出研究成果，建立了 Sn 基无铅钎料的蠕变模型，揭示了添加微量稀土元素可以获得组织及性能更为优良的钎料合金。	无	2
赵杰	教授	大连理工大学	大连理工大学	在无铅钎料合金疲劳性能与理论、无铅焊点连接的可靠性物理等方面进行了系统研究，揭示了无铅钎料的疲劳裂纹扩展性能普遍优于传统锡铅钎料，表征了疲劳裂纹扩展模型，阐明微小无铅焊点在电、热、力等作用下的失效模式与失效机理。	无	3
马海涛	教授	大连理工大学	大连理工大学	对无铅焊点的热稳定性和剪切性能进行了系统研究，阐明了无铅焊点在热、力作用下的失效模式，发现了第三组元元素可有效抑制界面金属间化合物的生长，提高了时效过程中无铅焊点剪切强度。阐明了微小尺度无铅焊点的失效模式与失效机理。	无	4
王来	教授	大连理工大学	大连理工大学	提出 Sn 基无铅钎料合金蠕变本构关系的理论模型，揭示了稀土元素对提高无铅钎料润湿性能、细化钎料基体金属间化合物晶粒尺寸及抑制界面金属间化合物生长的作用机制。发展和完善了无铅界面反应理论。	无	5

## 七、完成人合作关系说明

黄明亮、胡志文、赵杰、马海涛、王来 5 人共同获得 2014 年度中国材料研究学会科学技术一等奖。

黄明亮、赵杰、马海涛、王来共同承担完成了国家自然科学基金重点项目《无铅化电子封装钎焊界面反应及焊点可靠性的基础研究》(项目编号 U0734006)，起止时间：2008-2011 年。

黄明亮、王来、胡志文共同发表代表性论文 Creep behavior of eutectic Sn-Ag lead-free solder alloy / Journal of Materials Research / 2002 年，17 卷，2897-2903 页。

胡志文、王来共同发表代表性论文 Properties of lead-free solder alloys with rare earth element additions / Materials Science & Engineering R-Reports / 2004 年，44 卷，1-44 页。

王来、赵杰、黄明亮共同发表代表性论文 Improvement of wettability and tensile property in Sn-Ag-RE lead-free solder alloy / Materials Letters / 2002 年，56 卷，1039-1042 页。

完成人合作关系情况汇总表

序号	合作方式	合作者/项目排名	合作时间	合作成果	证明材料	备注
1	共同获奖	黄明亮(1)、赵杰(2)、马海涛(3)、王来(4)、胡志文(6)	2014	电子封装界面反应与无铅钎料性能基础理论研究	附件(证书)	5 人共同获得 2014 年度中国材料研究学会科学技术一等奖
2	共同立项	黄明亮(1)、王来(2)、赵杰(3)、马海涛(4)	2008-2011	国家自然科学基金重点项目《无铅化电子封装钎焊界面反应及焊点可靠性的基础研究》(项目编号 U0734006)		查询国家自然科学基金委网站
3	论文合著	黄明亮(1)、王来(2)、胡志文(3)	2002	Creep behavior of eutectic Sn-Ag lead-free solder alloy	代表性论文 3	
4	论文合著	胡志文(1)、王来(4)	2004	Properties of lead-free solder alloys with rare earth element additions	代表性论文 1	
5	论文合著	王来(1)、赵杰(3)、黄明亮(4)	2002	Improvement of wettability and tensile property in Sn-Ag-RE lead-free solder alloy	代表性论文 5	

## 八、知情同意证明

### 关于《基于绿色制造的先进微互连技术基础研究》项目 推荐申报国家奖的知情同意证明

本人以第一作者发表在 Journal of Alloys and Compounds 期刊上题目《Improvement on the microstructure stability, mechanical and wetting properties of Sn-Ag-Cu lead-free solder with the addition of rare earth elements》(Yu D Q, Zhao J, Wang L, 2004 年 376 卷 170-175 页)的论文, 通讯作者是导师王来教授, 本人对推荐申报国家奖知情并同意。

于大金  
2017.1.3

本人以第一作者发表在 Journal of Alloys and Compounds 期刊上题目《Microstructural evolution of Sn-9Zn-3Bi solder/Cu joint during long-term aging at 170 degrees C》(Duan L L, Yu D Q, Han S Q, Ma H T, Wang L, 2004 年 381 卷 202-207 页)的论文, 通讯作者是导师王来教授, 本人对推荐申报国家奖知情并同意。

段利雷  
2016.12.27