



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

有色金属

理论与技术前沿丛书

SERIES OF THEORETICAL AND TECHNOLOGICAL FRONTIERS OF
NONFERROUS METALS

AuSn20焊料的制备与应用基础

PREPARATION AND APPLICATION FOUNDATION OF AuSn20 SOLDER

韦小凤 王日初 著
Wei Xiaofeng Wang Richu



中南大学出版社
www.csupress.com.cn



中国有色集团



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

有色金属理论与技术前沿丛书

AuSn20 焊料的制备与应用基础

PREPARATION AND APPLICATION FOUNDATION OF AuSn20 SOLDER

韦小凤, 王日初 著
Wei Xiaofeng Wang Richu



中南大学出版社
www.csupress.com.cn



中国有色集团

图书在版编目(CIP)数据

AuSn20 焊料的制备与应用基础/韦小凤,王日初著. —长沙:
中南大学出版社, 2017. 3

ISBN 978 - 7 - 5487 - 2722 - 4

I. ①A... II. ①韦... ②王... III. ①软钎料 - 研究 IV. ①TG425

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 043405 号

AuSn20 焊料的制备与应用基础

AuSn20 HANLIAO DE ZHIBEI YU YINGYONG JICHU

韦小凤 王日初 著

☐责任编辑 史海燕

☐责任印制 易红卫

☐出版发行 中南大学出版社

社址:长沙市麓山南路

邮编:410083

发行科电话:0731-88876770

传真:0731-88710482

☐印 装 长沙鸿和印务有限公司

☐开 本 720 × 1000 1/16 ☐印张 9 ☐字数 181 千字 ☐插页

☐版 次 2017 年 3 月第 1 版 ☐2017 年 3 月第 1 次印刷

☐书 号 ISBN 978 - 7 - 5487 - 2722 - 4

☐定 价 42.00 元

图书出现印装问题,请与经销商调换

内容简介

Introduction

该书以国内外高气密封装用金基合金为基础,着重阐述 Au-Sn 共晶合金箔带材钎料的制备与应用基础。作者探索 Au-Sn 共晶合金箔带材钎料的制备新技术,并探讨其在封装应用中的焊接性能、界面结合强度和组织稳定性;同时研究老化退火和基板表面镀层对 Au-Sn 焊点力学可靠性的影响。书中涵盖的内容对高气密、高可靠性电子封装中 Au-Sn 钎料的应用及其焊点的可靠性评估具有重要的参考价值和借鉴意义。

该书内容丰富、数据详实、结构严谨、可读性强,可以作为材料科学专业的相关教学与研究的参考用书,也可以供从事电子封装材料研究、开发和生产的技术人员参考。

作者简介

About the Authors

韦小凤，女，1983年生，博士，西北农林科技大学机械与电子工程学院讲师。2014年博士毕业于中南大学材料科学与工程学院材料学专业。主要从事电子封装用贵金属焊料的制备与应用研究，发表SCI论文6篇，EI论文7篇。

王日初，男，1965年生，博士，教授，博士研究生导师，中南大学金属材料研究所负责人，湖南省铸造学会副秘书长。目前主要从事快速凝固及喷射沉积技术、水激活电池阳极材料设计与制备、高热导电子封装材料、氧化物陶瓷基片及材料表面改性等几个领域的研究工作，主持国家级项目与军品项目10余项。在相关的研究工作中，发表学术论文80余篇。

学术委员会

Academic Committee

国家出版基金项目
有色金属理论与技术前沿丛书

主 任

王淀佐 中国科学院院士 中国工程院院士

委 员 (按姓氏笔画排序)

于润沧	中国工程院院士	古德生	中国工程院院士
左铁镛	中国工程院院士	刘业翔	中国工程院院士
刘宝琛	中国工程院院士	孙传尧	中国工程院院士
李东英	中国工程院院士	邱定蕃	中国工程院院士
何季麟	中国工程院院士	何继善	中国工程院院士
余永富	中国工程院院士	汪旭光	中国工程院院士
张文海	中国工程院院士	张国成	中国工程院院士
张 懿	中国工程院院士	陈 景	中国工程院院士
金展鹏	中国科学院院士	周克崧	中国工程院院士
周 廉	中国工程院院士	钟 掘	中国工程院院士
黄伯云	中国工程院院士	黄培云	中国工程院院士
屠海令	中国工程院院士	曾苏民	中国工程院院士
戴永年	中国工程院院士		

编辑出版委员会

Editorial and Publishing Committee

国家出版基金项目
有色金属理论与技术前沿丛书

主 任

罗 涛(教授级高工 中国有色矿业集团有限公司总经理)

副主任

邱冠周(教授 国家“973”项目首席科学家)

陈春阳(教授 中南大学党委常委、副校长)

田红旗(教授 中南大学副校长)

尹飞舟(编审 湖南省新闻出版局副局长)

张 麟(教授级高工 大冶有色金属集团控股有限公司董事长)

执行副主任

王海东 王飞跃

委 员

苏仁进 文援朝 李昌佳 彭超群 谭晓萍

陈灿华 胡业民 史海燕 刘 辉 谭 平

张 曦 周 颖 汪宜晔 易建国 唐立红

李海亮

总序

Preface

当今有色金属已成为决定一个国家经济、科学技术、国防建设等发展的重要物质基础,是提升国家综合实力和保障国家安全的关键性战略资源。作为有色金属生产第一大国,我国在有色金属研究领域,特别是在复杂低品位有色金属资源的开发与利用上取得了长足进展。

我国有色金属工业近 30 年来发展迅速,产量连年来居世界首位,有色金属科技在国民经济建设和现代化国防建设中发挥着越来越重要的作用。与此同时,有色金属资源短缺与国民经济发展需求之间的矛盾也日益突出,对国外资源的依赖程度逐年增加,严重影响我国国民经济的健康发展。

随着经济的发展,已探明的优质矿产资源接近枯竭,不仅使我国面临有色金属材料总量供应严重短缺的危机,而且因为“难探、难采、难选、难冶”的复杂低品位矿石资源或二次资源逐步成为主体原料后,对传统的地质、采矿、选矿、冶金、材料、加工、环境等科学技术提出了巨大挑战。资源的低质化将会使我国有色金属工业及相关产业面临生存竞争的危机。我国有色金属工业的发展迫切需要适应我国资源特点的新理论、新技术。系统完整、水平领先和相互融合的金属科技图书的出版,对于提高我国有色金属工业的自主创新能力,促进高效、低耗、无污染、综合利用有色金属资源的新理论与新技术的应用,确保我国有色金属产业的可持续发展,具有重大的推动作用。

作为国家出版基金资助的国家重大出版项目,“有色金属理论与技术前沿丛书”计划出版 100 种图书,涵盖材料、冶金、矿业、地学和机电等学科。丛书的作者荟萃了有色金属研究领域的院士、国家重大科研计划项目的首席科学家、长江学者特聘教授、国家杰出青年科学基金获得者、全国优秀博士论文奖获得者、国家重大人才计划入选者、有色金属大型研究院所及骨干企

业的顶尖专家。

国家出版基金由国家设立，用于鼓励和支持优秀公益性出版项目，代表我国学术出版的最高水平。“有色金属理论与技术前沿丛书”瞄准有色金属研究发展前沿，把握国内外有色金属学科的最新动态，全面、及时、准确地反映有色金属科学与工程方面的新理论、新技术和新应用，发掘与采集极富价值的研究成果，具有很高的学术价值。

中南大学出版社长期倾力服务有色金属的图书出版，在“有色金属理论与技术前沿丛书”的策划与出版过程中做了大量极富成效的工作，大力推动了我国有色金属行业优秀科技著作的出版，对高等院校、研究院所及大中型企业的有色金属学科人才培养具有直接而重大的促进作用。

王淀佐

2010 年 12 月

前言

Foreword

Au-Sn 共晶钎料的成分为 AuSn20。该合金具有优良的耐蚀性和抗氧化性能、良好的流动性和高温稳定性等优点,可焊接可伐合金、不锈钢、铜和镍等,尤其适用于真空器件以及航空发动机等重要零部件的焊接,因此在航空和电子工业中得到了广泛的应用。尽管如此,AuSn20 合金在电子封装中的应用仍存在一系列的缺点与不足。例如,合金极脆,难以加工成为电子封装所需的箔带材;与常用 Cu、Ni 基板焊接后形成的界面金属间化合物(IMC)层的生长影响界面结合强度;焊点服役过程中造成工作温度升高而加速焊点失效等。此外,AuSn20 焊点的失效机理及其疲劳寿命预测也有待进一步研究。

目前,主要采用电镀沉积、靶材溅射沉积及室温冷轧复合等技术制备 AuSn20 焊料,在一定程度上解决了 AuSn20 合金箔带材产品制备困难的问题。然而,电镀沉积法制备 AuSn20 合金的效率较低,难以推广应用。靶材溅射沉积法制造工序复杂,对设备要求高,制备成本高。室温冷轧复合法设备相对简单,操作方便,但是缺乏冷轧过程的变形计算,导致焊料成分均匀性差,制备技术有待进一步完善。此外,焊料的焊接性能、焊点的可靠性研究对于 AuSn20 焊料在电子封装中的推广应用至关重要,深入研究 AuSn20 焊点的断裂行为、失效机理是进行焊点可靠性评估的关键。

本书以微电子封装用箔材 AuSn20 焊料为背景,采用叠层冷轧-合金化退火法制备 AuSn20 箔带材焊料,利用扫描电镜(SEM)、X 射线衍射(XRD)和差热分析(DSC)等实验手段研究叠轧和退火过程中焊料的组织演变和性能,并制订最佳轧制和退火工艺。根据 AuSn20 焊料的实际应用情况,采用实验模拟的方法研究 AuSn20 焊料的焊接性能、焊点的可靠性,以及焊接界面失

效的影响因素；结合理论计算和实验验证，探讨 AuSn20/Ni(Cu) 焊点界面金属间化合物(IMC)层的生长动力学，并在此基础上评估焊点的力学可靠性。全书共分为6章，内容分别如下：第1章，介绍国内外电子封装中 AuSn20 焊料的制备与应用现状；第2章，探索 AuSn20 合金箔带材的叠层冷轧新技术；第3章，采用低温退火的方法使其合金化；第4章，研究焊接工艺和老化退火对 AuSn20 焊点的显微组织和力学性能的影响；第5章，在老化退火的基础上，研究 AuSn20 焊点界面金属间化合物层的生长动力学行为；第6章，研究在同一焊点中不同焊接界面对焊点组织和力学性能的影响，并分析双界面的耦合机理。

本书在撰写过程中得到了彭超群教授、冯艳副教授、王小锋副教授和朱学卫博士的关心和指导，其出版得到了陕西省科技攻关项目(编号：K3310216104)和西北农林科技大学博士启动项目(编号：Z109021504 和 Z109021614)的支持，在此一并表示感谢。

由于作者的学术水平有限，书中难免存在一些误漏之处，敬请同行专家和广大读者批评指正。

目录

Contents

第1章 绪 论	(1)
1.1 引言	(1)
1.2 电子封装材料	(2)
1.2.1 无铅焊料合金	(2)
1.2.2 Sn 基无铅焊料合金	(4)
1.2.3 金基焊料合金	(5)
1.3 金锡焊料	(5)
1.3.1 金锡焊料的性能	(6)
1.3.2 金锡焊料的制备方法	(8)
1.3.3 金锡焊料焊接技术改进	(10)
1.3.4 金锡焊料与基板的界面反应	(12)
1.4 焊点可靠性	(14)
1.4.1 引起焊点失效的主要原因	(14)
1.4.2 无铅焊点可靠性的影响因素	(15)
1.4.3 无铅焊点可靠性测试方法	(16)
1.4.4 焊点可靠性预测	(18)
1.5 需要研究的内容	(19)
第2章 叠层冷轧法制备 Au/Sn 复合带	(22)
2.1 引言	(22)
2.2 实验	(22)
2.2.1 叠层实验设计	(22)
2.2.2 叠层冷轧	(23)
2.2.3 性能检测	(24)
2.3 Au/Sn 复合带的冷轧工艺优化	(24)

2.3.1	叠合层数对 Au/Sn 复合带的组织和成分的影响	(24)
2.3.2	轧制工艺对 Au/Sn 复合带显微组织的影响	(26)
2.3.3	轧制工艺对 Au/Sn 复合带成分和熔点的影响	(29)
2.4	Au/Sn 复合带叠轧过程的界面反应	(33)
2.5	本章小结	(37)
第 3 章	AuSn20 焊料的合金化退火	(38)
3.1	引言	(38)
3.2	实验	(38)
3.2.1	退火实验	(38)
3.2.2	焊料组织观察和性能检测	(39)
3.3	Au/Sn 复合带在退火过程中的组织演变	(39)
3.3.1	退火时间对 Au/Sn 复合带组织的影响	(39)
3.3.2	退火温度对 Au/Sn 复合带组织的影响	(41)
3.4	Au/Sn 界面金属间化合物(IMC)层的生长行为	(44)
3.4.1	合金化退火过程 IMC 层的生长动力学	(44)
3.4.2	叠层冷轧对 IMC 层生长行为的影响	(46)
3.4.3	合金化退火过程中 IMC 层的相转变	(48)
3.5	合金化退火后焊料的相组成和熔化特性分析	(52)
3.6	本章小结	(53)
第 4 章	AuSn20/Cu(Ni)焊点的界面反应及性能	(54)
4.1	引言	(54)
4.2	实验	(55)
4.2.1	焊点制备	(55)
4.2.2	性能检测	(56)
4.3	AuSn20/Cu 焊点的显微组织	(56)
4.4	AuSn20/Ni 焊点的显微组织与性能	(57)
4.4.1	AuSn20/Ni 焊点的显微组织	(57)
4.4.2	AuSn20/Ni 焊点的剪切性能与断口形貌	(65)
4.5	老化退火对 AuSn20/Ni 焊点组织与性能的影响	(67)
4.5.1	老化退火对 AuSn20/Ni 焊点组织的影响	(67)
4.5.2	Ni 镀层的厚度对界面 IMC 层的影响	(73)
4.5.3	老化退火对 AuSn20/Ni 焊点剪切强度的影响	(76)

4.5.4 AuSn20/Ni 焊点的剪切断裂分析	(82)
4.6 本章小结	(83)
第 5 章 AuSn20/Ni 焊接界面 IMC 层生长动力学	(84)
5.1 引言	(84)
5.2 实验方法	(84)
5.3 未钎焊的 AuSn20/Ni 扩散偶中 IMC 层的生长动力学	(85)
5.3.1 扩散偶的显微组织	(85)
5.3.2 扩散偶 IMC 层的生长动力学	(88)
5.4 Ni/AuSn20/Ni 焊点中 IMC 层的生长动力学	(92)
5.4.1 焊点 IMC 层的生长动力学	(92)
5.4.2 焊点剪切失效预测	(97)
5.5 本章小结	(98)
第 6 章 AuSn20 焊点的耦合界面反应	(100)
6.1 引言	(100)
6.2 实验	(100)
6.2.1 Cu/AuSn20/Ni 焊点制备	(100)
6.2.2 组织观察与性能检测	(100)
6.3 Cu/AuSn20/Ni 焊点的组织和性能	(101)
6.3.1 钎焊时间对 Cu/AuSn20/Ni 焊点显微组织的影响	(101)
6.3.2 钎焊时间对 Cu/AuSn20/Ni 焊点剪切强度的影响	(105)
6.3.3 老化退火对 Cu/AuSn/Ni 焊点显微组织的影响	(107)
6.3.4 老化退火对 Cu/AuSn/Ni 焊点剪切强度的影响	(110)
6.4 Cu/AuSn20/Ni 焊点 IMC 层的生长	(112)
6.4.1 AuSn20/Ni 界面 IMC 层的生长动力学	(112)
6.4.2 Cu/AuSn20 界面 IMC 层的生长动力学	(113)
6.5 耦合反应对 IMC 层生长动力学的影响	(116)
6.6 本章小结	(117)
参考文献	(119)

第1章 绪 论

1.1 引言

21 世纪以来,信息技术已成为经济发展和社会进步的驱动力,被誉为人类的第四次工业革命。信息化的发展取决于软件的更新、硬件的革命和可靠性工程的实施。随着超大规模集成电路和微型化片式元器件的不断发展,电路或系统的封装和组装逐渐转变成影响电子整机和系统进一步实现高性能及小型化的主要因素。目前集成电路(IC)的封装及其与系统主板的连接,控制着计算机中央处理器(CPU)的速度和时钟频率,进而决定着计算机的性能。电子封装材料与技术已成为提升电子产品性能和可靠性的决定性因素^[1-3]。

电子封装不仅直接影响着电路本身的电性能、力学性能、光性能和热性能,而且还在很大程度上决定着整机系统的小型化、多功能化及其生产成本。广义的封装一般是指将半导体和电子元器件所具有的电子和物理功能转变为适用于设备或系统形式的科学技术。狭义的封装是指利用膜技术及微细连接技术将半导体元器件与其他构成要素,在框架或基板上布置、固定并连接,形成整体立体结构的工艺技术^[7]。电子封装的作用概括起来主要有以下几点:①提供芯片的信号输入和输出的连接通路;②提供半导体的散热通路,主要是散逸芯片的热量;③充当芯片的电流流通渠道;④提供半导体芯片的机械支撑和环境保护^[5]。

电子封装技术是伴随着器件的发展而发展起来的,其发展史也是器件性能不断提高、系统不断小型化的发展历程^[6],大致可分为以下几个阶段:①20 世纪 80 年代前的主流形式为通孔安装器件和插入式器件封装。②20 世纪 80 年代出现的表面贴装技术(SMT),改变了传统的插装形式,器件通过回流技术进行焊接。③20 世纪 90 年代中前期出现的球栅阵列(BGA)封装,既减轻了因引脚间距不断缩小所带来的阻力,又实现了封装密度的大幅增加。④20 世纪 90 年代后期,芯片尺寸封装技术的快速发展,使电子封装进入超高速发展时期,且新的封装形式不断涌现并获得应用,如倒装片(FC)、板上芯片(COB)、多芯片组件(MCM)等。⑤进入 21 世纪,电子封装在观念上发生了革命性变化,从原来的封装元件概念演变成封装系统,已将多个芯片和可能的无源元件集成在同一封装内形成具有系统功能的模块,因而可以实现更高的集成度、更小的成本和更大的灵活性。这是电

子封装的第三次重大变革,代表性的产品有系统封装(SIP)。

根据电子封装的发展历程,预测其发展趋势如下^[6,7]:①电子封装继续朝着超小型的方向发展。②电子封装从二维向三维方向发展,出现三维封装形式。③电子封装继续由单芯片向多芯片方向发展。除 MCM 外,还会出现各种多芯片封装形式。④电子封装继续由分立向系统方向发展。电子封装技术的发展过程中形成了一些新领域,如微电子机械系统(MEMS)封装、微光机电系统(MOEMS)封装、宽禁带半导体高温电子封装和毫米波封装。封装技术的新进展、新领域以及人们环保意识的增强,使电子封装技术面临许多新的挑战,其中以焊料无铅化的问题最为突出。

1.2 电子封装材料

随着电子封装材料的发展以及人类健康意识的提高,人们在追求电子产品高性能、高质量的同时,更加注重其无毒、绿色和环境友好等特点。在法律和市场等因素的约束和推动下,国内外各种组织对绿色电子封装材料的研究与开发日益活跃。长期以来,锡铅(Sn-Pb)的共晶和亚共晶焊料被广泛地应用于电子电路的封装和组装。然而铅是一种有毒的金属,对人体和环境危害极大。铅的毒性在于它在人体内不能被分解,被摄取后在人体内聚集而不能排出。其一旦与人体内的血红蛋白结合就会抑制人体的正常生理功能,改变感知和行为能力,使神经和身体发育迟缓,尤其对幼童的神经发育危害更大^[8-10]。此外,电子器件中含铅材料的 α 粒子释放还可能会导致软件错误运行,因此,电子产品的无铅化势在必行。

世界各国已通过制定法律、法规来限制铅等有毒有害物质的使用。欧盟早在2003年1月就发布了“废弃电力电子设备指令”(简称WEEE)和“电力电子设备中禁用特定有害物质指令”(简称ROHS),并已于2006年7月正式实施^[11]。近年来,出于商业及市场的考虑,各国对无铅焊料及电子制造无铅化技术的推广非常积极,无铅焊料的研究也受到广泛重视。

1.2.1 无铅焊料合金

焊料的熔点、可焊性及其焊点的强度、疲劳和蠕变性能等均可影响电子产品的质量,选择合适的焊料对获得可靠封装和有效连接非常重要^[12]。在电子封装中,焊料主要起机械连接、电气连接和热连接作用。在各级电子封装中,尤其在二级封装(将元器件或封装好的芯片组装到印制电路板PCB上)中,焊料是最主要的连接方式。几乎所有的微电子设备都是靠焊料封装到PCB板上的,其封装技术主要有通孔技术(PTH)和表面封装技术(SMT)。随着面阵封装(FCBGA)的问

世，焊料在一级封装上的使用也更加普遍。

焊料通常按其熔化温度范围分为两类。一般熔化温度低于 450℃ 的焊料称为软焊料(也称为易熔焊料)，常见的有锡基、锌基、钢基、铋基、镉基和镓基等。熔化温度高于 450℃ 的称为硬焊料(也称为难熔焊料)，常见的有铜基、铝基、镍基、金基、银基、镁基和锰基等。图 1-1^[13]所示为各类焊料的熔化温度范围。

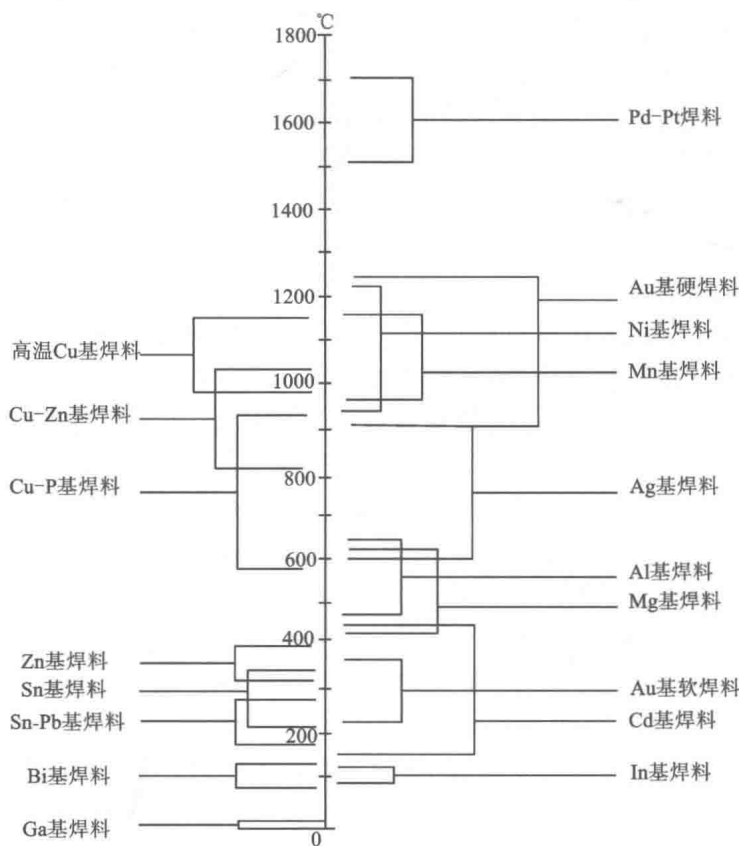


图 1-1 各种焊料的熔化温度范围^[13]

Fig. 1-1 Melting temperature range of the commonly used solders^[13]

理想的无铅焊料应满足以下基本要求^[14,15]：①具有与 Sn-Pb 共晶焊料相近的熔点，合金相图的液-固两相区较窄；②润湿性、流动能力以及焊点成型等工艺性能良好；③物理性能(热导率、电导率)、化学性能(耐蚀性)、力学性能(强度、延伸率、抗蠕变性、抗疲劳性、组织稳定性)等满足性能评价标准；④加工性能良好，易加工成焊丝、焊膏等所需的各种形式；⑤环境友好、无毒、可再循环；⑥具有与各种基材相近的热膨胀系数；⑦成本低廉。