

电子封装技术丛书

Advanced Flip Chip Packaging

先进倒装芯片封装技术

唐和明 (Ho-Ming Tong)

赖逸少 (Yi-Shao Lai)

主编



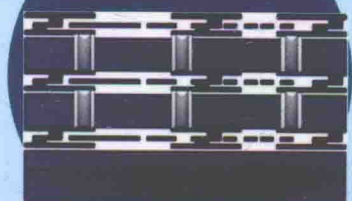
【美】汪正平 (C.P. Wong)

《电子封装技术丛书》编辑委员会
中国电子学会电子制造与封装技术分会

组织译审



化学工业出版社



电子封装技术丛书
Series of Electronic Packaging Technology

Advanced Flip Chip Packaging

先进倒装芯片封装技术


唐和明 (Ho-Ming Tong)

赖逸少 (Yi-Shao Lai)

主编 

【美】汪正平 (C.P. Wong)

《电子封装技术丛书》编辑委员会
中国电子学会电子制造与封装技术分会

组织译审 

秦飞 别晓锐 安彤 主译 

于大全 段瑞飞 主审 



化学工业出版社

· 北京 ·

本书由倒装芯片封装技术领域世界级专家撰写而成，系统总结了过去十几年倒装芯片封装技术的发展脉络和最新成果，并对未来的发展趋势做出了展望。内容涵盖倒装芯片的市场与技术趋势、凸点技术、互连技术、下填料工艺与可靠性、导电胶应用、基板技术、芯片-封装一体化电路设计、倒装芯片封装的热管理和热机械可靠性问题、倒装芯片焊锡接点的界面反应和电迁移问题等。

本书适合从事倒装芯片封装技术以及其他先进电子封装技术研究的工程师、科研人员和技
术管理人员阅读，也可以作为电子封装相关专业高年级本科生、研究生和培训人员的教材和参
考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

先进倒装芯片封装技术/(中国台湾)唐和明,(中国台湾)
赖逸少,(美)汪正平主编;秦飞,别晓锐,安彤主译. —北京:
化学工业出版社, 2017. 1

(电子封装技术丛书)

书名原文: Advanced Flip Chip Packaging

ISBN 978-7-122-27683-4

I. ①先… II. ①唐…②赖…③汪…④秦…⑤别…
⑥安… III. ①芯片-封装工艺 IV. ①TN43
中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 171663 号

Advanced Flip Chip Packaging/Edited by Ho-Ming Tong, Yi-Shao Lai and C. P. Wong

ISBN 978-1-4419-5767-2

Copyright © Springer Science+Business Media New York 2013. All rights reserved.

Authorized translation from the English language edition published by Springer Science+Business
Media.

本书中文简体字版由 Springer Science+Business Media 授权化学工业出版社独家出版发行。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分,违者必究。

北京市版权局著作权合同登记号: 01-2015-0141

责任编辑: 吴 刚
责任校对: 边 涛

文字编辑: 陈 喆
装帧设计: 韩 飞

出版发行: 化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷: 北京永鑫印刷有限责任公司

装 订: 三河市宇新装订厂

710mm×1000mm 1/16 印张 29 字数 628 千字 2017 年 2 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价: 198.00 元

版权所有 违者必究

《电子封装技术丛书》编辑委员会

顾 问：俞忠钰 王阳元 邹世昌 许居衍 余寿文
龚 克 郝 跃 王 曦 汪 敏 徐晓兰

主 任：毕克允

副主任：汤小川 秦 飞 张蜀平 陈长生

编 委：(以姓氏笔画为序)

丁冬雁	万里兮	马莒生	王 红	王 谦
王春青	王新潮	孔令文	石 磊	石明达
田艳红	史训清	冯小龙	毕克允	朱文辉
朱颂春	刘 胜	刘兴军	任爱光	李 明
李可为	汤小川	杨士勇	杨银堂	杨崇峰
杨道国	肖 斐	肖胜利	张 弓	张 宏
张国旗	张建华	张蜀平	陈长生	陈田安
武 祥	尚金堂	罗 乐	郑宏宇	郑学军
郑晓光	赵 宁	赵元富	封其立	贵大勇
禹胜林	秦 飞	柴广跃	柴志强	恩云飞
徐忠华	郭永兴	唐 亮	陶建中	曹立强
崔成强	韩江龙	程 凯	赖志明	蔡 坚
樊学军				

译序

当前，全球已经步入信息化时代，电子信息技术极大地改变了人类的生活和工作方式，并成为体现一个国家综合国力的重要标志之一。半导体集成电路技术作为电子信息技术的基石，也由此成为颇具创新力和融合力的发展领域。目前，在全球范围内已经形成了集成电路设计、制造和封装测试三大产业链，成为半导体集成电路产业不可或缺的三大产业支柱。

随着电子信息技术的飞速发展，对电子产品的小型化、多功能、高可靠性和低成本等提出了越来越高的要求。为了满足这些要求，电子封装技术也正经历着日新月异的发展，涌现出诸多先进的封装技术。其中，倒装芯片封装作为主流的先进封装技术之一，具有低成本、高性能和高可靠性的优点，已经广泛应用于计算机、通讯、消费类等电子产品中。而随着电子产品集成度的不断提高，以及消费者对产品性能、尺寸、成本的需求，未来倒装芯片封装技术仍将持续快速发展。

为了适应我国电子封装产业的发展，满足广大电子封装工程技术人员的迫切需求，中国电子学会电子制造与封装技术分会成立了“电子封装技术丛书”编辑委员会，组织丛书的编译工作。近年来，编委会已先后组织编写、翻译出版了《集成电路试验手册》（1998年电子工业出版社出版）、《微电子封装手册》（2001年电子工业出版社出版）、《微电子封装技术》（2003年中国科学技术大学出版社出版）、《电子封装材料与工艺》（2006年化学工业出版社出版）、《MEMS/MOEMS封装技术》（2008年化学工业出版社出版）、《电子封装工艺设备》（2012年化学工业出版社出版）、《电子封装与可靠性》（2012年化学工业出版社出版）、《系统级封装导论》（2014年化学工业出版社出版）、《三维电子封装的硅通孔技术》（2014年化学工业出版社出版）共九本书籍。《先进倒装芯片封装技术》一书是这一系列丛书中第十本。

本书译自日月光集团公司 Ho-Ming Tong、Yi-Shao Lai 和香港中文大学 C. P. Wong 院士主编并于 2013 年出版的专著《Advanced Flip Chip Packaging》，该书内容涵盖了倒装芯片封装技术的发展历史和趋势，重点讨论了凸点制作技术、基板技术、封装材料、IC 封装系统集成设计、热管理技术、热机械可靠性以及焊点的界面反应与电迁移问题等。该书对从事电子封装及相关行业的科研、生产、应用工作者都会有较高的使用价值，对高等院校相关专业的师生也具有一定的参考意义。

我相信本书中译本的出版发行将对我国电子封装行业的发展起到积极的推动作用。在本书翻译过程中，秦飞教授、于大全博士做了许多工作，在此表示诚挚的谢

意。同时，我也向北京工业大学参与组织该书翻译的全体师生及化学工业出版社工作人员，表示衷心的感谢！

畢克先

译者的话

十几年前，倒装芯片封装技术由于成本较高，只用于如大型机和工作站之类的高端、高性能产品。但是，今天低成本、高可靠性的倒装芯片封装在计算机、通信、消费类和汽车电子等产品中的应用激增，而且，未来对倒装芯片的需求将进一步增长，以满足消费者对性能、尺寸、成本和环境兼容性等永不满足的需求。特别是对于手机、便携式电脑等移动电子产品，随着系统级功能集成加速，倒装芯片封装技术的发展也将加速。

然而，与10年前相比，今天的倒装芯片封装技术已发生较大变化，这些变化主要来自以下几个方面：（1）随着摩尔定律芯片的介电层从非低 k 演进到低 k 、超低 k ，以及技术节点从45nm转向32nm及以下，使得芯片-封装相互作用问题突出，必须在产品量产以前加以解决。另外，随着系统级功能集成进程加速，要求芯片、封装、模组、板级/系统级采用更细的节距，甚至在特定应用中采用具有更细节距的大尺寸倒装芯片。这些技术驱动促使倒装芯片的基板、下填料、互连、设计、仿真和可靠性设计等技术持续演进。（2）环保驱动。欧共体颁布的RoHS强制性标准促使倒装芯片封装技术采用绿色环保材料和工艺。（3）成本驱动。在当今消费电子时代，为取得价格优势，制造商不得不开发低成本的倒装芯片结构、工艺、材料和设备。

由于倒装芯片技术的快速发展，国内企业技术人员和研究机构的研究人员亟须一本能反映倒装芯片封装技术进展的新书。然而，中文版的倒装芯片封装技术类的图书少之又少。10年前，化学工业出版社出版了刘汉诚（John H. Lau）博士编写的《低成本倒装芯片技术》中译本（2006年4月第1版），此后再没有出版过介绍国外最新倒装芯片封装技术的专著。

由日月光集团公司 Ho-Ming Tong、Yi-Shao Lai 和香港中文大学 C. P. Wong 院士主编并于2013年出版的专著《Advanced Flip Chip Packaging》就是这样一本书。该书由行业内20多位知名专家撰写而成，涵盖了与倒装球栅阵列和倒装晶圆级封装相关技术的过去、现在和将来的演变趋势，为电子封装领域的技术研发人员和研究人员提供了完整的、最新的信息。

为满足国内企业技术人员和科研人员的需要，中国电子学会电子制造与封装技术分会、《电子封装技术丛书》编辑委员会组织了英文版专著《Advanced Flip Chip Packaging》的翻译工作。全书由北京工业大学先进电子封装技术与可靠性研究所秦飞、别晓锐、安彤主译，陈沛、武伟、陈思、史戈、孙敬龙、赵静毅、周琳丰、张理想、马瑞等参与了翻译工作。全书由秦飞教授统稿，并邀请天水华天科技股份有限公司先进封装技术研究院院长于大全博士、中国科学院半导体所段瑞飞博士对译文进行了认真审阅和校正。《电子封装技术丛书》编辑委员会主任毕克允教授对

翻译工作给予了大力支持和精心指导。

本书在翻译过程中，力求准确再现英文版的技术细节，并在认真核对的基础上，对英文版中的个别地方进行了补漏。考虑到书中大量使用缩略语，中文版以附录形式增加了缩略语表。

由于水平有限，书中不妥之处在所难免，敬请读者批评指正。

译 者

原著前言

据我们所知，倒装芯片封装技术类的图书大部分都是在 10 年前编辑和出版的，比较经典的包括刘汉诚（John H. Lau）博士主编的《低成本倒装芯片技术》（McGraw Hill 出版，2006 年 4 月化学工业出版社翻译出版）。那时，倒装芯片技术是“奢侈品”，只用于如大型机和工作站之类的高端、高性能产品。但是，在过去的 10 年里，技术的进步使得低成本、高可靠性倒装芯片封装在 4C（计算机、通信、消费类和汽车电子）产品以及其他电子产品中的应用激增。随着我们进入电子消费时代，对倒装芯片的需求将进一步增长，以满足消费者对性能、尺寸、成本和环境兼容性等永不满足的需求。

过去 10 年里发生的重要变化使得今天的倒装芯片封装与以往大不相同。随着摩尔定律芯片的介电层从非低 k 演进到低 k ，由于低 k 介电层机械强度较弱，芯片-封装相互作用必须在产品化以前加以解决。而且，随着半导体产业的技术节点从 45nm 转向 32nm 及以下，芯片-封装相互作用问题更加突出。除此以外，欧共体颁布的、2006 年开始实行的 RoHS 强制性标准促使全球半导体业（包括倒装芯片制造商和提供商）从含铅封装转向无铅、无卤素封装。过去的 10 年里，像倒装芯片这样的先进封装可以取得高溢价，而在如今的消费时代，为取得价格优势，倒装芯片正在被其他低成本的封装取代。这种大趋势促使制造商开发低成本的倒装芯片结构、工艺、材料和设备。而且，随着系统级功能集成进程加速，整个半导体工业也转向在芯片、封装、模组、板级/系统级中采用更细的节距；在特定应用中，甚至采用具有更细节距的较大尺寸倒装芯片。为支撑倒装芯片的增长，伴生的基板、下填料、互连、设计、仿真和可靠性设计等技术都在持续演进。由于上述原因，具有最高密度的倒装芯片封装技术也在不断再创新，以应对日益增长的对性能、成本、尺寸、环保等的要求。展望未来，随着系统级功能集成加速，倒装芯片封装技术的发展也将加速，特别是对于手机、便携式电脑等移动电子产品。

我们坚信，撰写一本能反映过去 10 年倒装芯片封装技术进展的新书是适时的，而且能够为相关领域的研究人员提供有价值的信息。《先进倒装芯片封装技术》就是这样的一本书，它论述了与倒装球栅阵列和倒装晶圆级封装相关技术的过去、现在和将来的演变趋势。

Ho-Ming Tong（唐和明），日月光集团公司

Yi-Shao Lai（赖逸少），日月光集团公司

C. P. Wong（汪正平），香港中文大学

目 录

第 1 章 市场趋势:过去、现在和将来	1
1.1 倒装芯片技术及其早期发展	2
1.2 晶圆凸点技术概述	2
1.3 蒸镀	3
1.3.1 模板印刷	3
1.3.2 电镀	4
1.3.3 焊坝	4
1.3.4 预定义结构外电镀	6
1.4 晶圆凸点技术总结	6
1.5 倒装芯片产业与配套基础架构的发展	7
1.6 倒装芯片市场趋势	9
1.7 倒装芯片的市场驱动力	11
1.8 从 IDM 到 SAT 的转移	13
1.9 环保法规对下填料、焊料、结构设计等的冲击	16
1.10 贴装成本及其对倒装芯片技术的影响	16
参考文献	16
第 2 章 技术趋势:过去、现在和将来	17
2.1 倒装芯片技术的演变	18
2.2 一级封装技术的演变	20
2.2.1 热管理需求	20
2.2.2 增大的芯片尺寸	20
2.2.3 对有害物质的限制	21
2.2.4 RoHS 指令与遵从成本	23
2.2.5 Sn 的选择	23
2.2.6 焊料空洞	24
2.2.7 软错误与阿尔法辐射	25
2.3 一级封装面临的挑战	26
2.3.1 弱 BEOL 结构	26
2.3.2 C4 凸点电迁移	27
2.3.3 Cu 柱技术	28
2.4 IC 技术路线图	28
2.5 3D 倒装芯片系统级封装与 IC 封装系统协同设计	31

2.6	PoP 与堆叠封装	32
2.6.1	嵌入式芯片封装	34
2.6.2	折叠式堆叠封装	34
2.7	新出现的倒装芯片技术	35
2.8	总结	37
	参考文献	37
第3章	凸点制作技术	40
3.1	引言	41
3.2	材料与工艺	41
3.3	凸点技术的最新进展	57
3.3.1	低成本焊锡凸点工艺	57
3.3.2	纳米多孔互连	59
3.3.3	倾斜微凸点	59
3.3.4	细节距压印凸点	60
3.3.5	液滴微夹钳焊锡凸点	60
3.3.6	碳纳米管 (CNT) 凸点	62
	参考文献	63
第4章	倒装芯片互连:过去、现在和将来	66
4.1	倒装芯片互连技术的演变	67
4.1.1	高含铅量焊锡接点	68
4.1.2	芯片上高含铅量焊料与层压基板上共晶焊料的接合	68
4.1.3	无铅焊锡接点	69
4.1.4	铜柱接合	70
4.2	组装技术的演变	71
4.2.1	晶圆减薄与晶圆切割	71
4.2.2	晶圆凸点制作	72
4.2.3	助焊剂及其清洗	74
4.2.4	回流焊与热压键合	75
4.2.5	底部填充与模塑	76
4.2.6	质量保证措施	78
4.3	C4NP 技术	79
4.3.1	C4NP 晶圆凸点制作工艺	79
4.3.2	模具制作与焊料转移	81
4.3.3	改进晶圆凸点制作良率	81
4.3.4	C4NP 的优点:对多种焊料合金的适应性	83
4.4	Cu 柱凸点制作	83
4.5	基板凸点制作技术	86
4.6	倒装芯片中的无铅焊料	90

4.6.1	无铅焊料的性能	91
4.6.2	固化、微结构与过冷现象	93
4.7	倒装芯片中无铅焊料的界面反应	93
4.7.1	凸点下金属化层	93
4.7.2	基板金属化层	95
4.7.3	无铅焊锡接点的界面反应	96
4.8	倒装芯片互连结构的可靠性	98
4.8.1	热疲劳可靠性	98
4.8.2	跌落冲击可靠性	99
4.8.3	芯片封装相互作用: 组装中层间电介质开裂	101
4.8.4	电迁移可靠性	104
4.8.5	锡疫	109
4.9	倒装芯片技术的发展趋势	109
4.9.1	传统微焊锡接点	110
4.9.2	金属到金属的固态扩散键合	113
4.10	结束语	114
	参考文献	115
第5章 倒装芯片下填料: 材料、工艺与可靠性		123
5.1	引言	124
5.2	传统下填料与工艺	125
5.3	下填料的材料表征	127
5.3.1	差示扫描量热法测量固化特性	127
5.3.2	差示扫描量热法测量玻璃转化温度	129
5.3.3	采用热机械分析仪测量热膨胀系数	130
5.3.4	采用动态机械分析仪测量动态模量	131
5.3.5	采用热重力分析仪测量热稳定性	133
5.3.6	弯曲实验	133
5.3.7	黏度测量	133
5.3.8	下填料与芯片钝化层粘接强度测量	134
5.3.9	吸湿率测量	134
5.4	下填料对倒装芯片封装可靠性的影响	134
5.4.1	钝化层的影响	136
5.4.2	黏附性退化与 85/85 时效时间	137
5.4.3	采用偶联剂改善粘接的水解稳定性	140
5.5	底部填充工艺面临的挑战	141
5.6	非流动型下填料	143
5.7	模塑底部填充	148
5.8	晶圆级底部填充	149
5.9	总结	153

参考文献	154
第 6 章 导电胶在倒装芯片中的应用	159
6.1 引言	160
6.2 各向异性导电胶/导电膜	160
6.2.1 概述	160
6.2.2 分类	160
6.2.3 胶基体	161
6.2.4 导电填充颗粒	161
6.2.5 ACA/ACF 在倒装芯片中的应用	162
6.2.6 ACA/ACF 互连的失效机理	167
6.2.7 纳米 ACA/ACF 最新进展	168
6.3 各向同性导电胶	173
6.3.1 引言	173
6.3.2 ICA 在倒装芯片中的应用	178
6.3.3 ICA 在先进封装中的应用	184
6.3.4 ICA 互连点的高频性能	187
6.3.5 ICA 互连点的可靠性	189
6.3.6 纳米 ICA 的最新进展	191
6.4 用于倒装芯片的非导电胶	194
6.4.1 低热膨胀系数 NCA	194
6.4.2 NCA 在细节距柔性基板芯片封装中的应用	196
6.4.3 快速固化 NCA	196
6.4.4 柔性电路板中 NCA 与 ACA 对比	197
参考文献	197
第 7 章 基板技术	205
7.1 引言	206
7.2 基板结构分类	207
7.2.1 顺序增层结构	207
7.2.2 Z 向堆叠结构	208
7.3 顺序增层基板	208
7.3.1 工艺流程	208
7.3.2 导线	210
7.3.3 微通孔	217
7.3.4 焊盘	225
7.3.5 芯片封装相互作用	231
7.3.6 可靠性	239
7.3.7 历史里程碑	245
7.4 Z 向堆叠基板	248

7.4.1	采用图形转移工艺的 Z 向堆叠基板	248
7.4.2	任意层导通孔基板	249
7.4.3	埋嵌元件基板	250
7.4.4	PTFE 材料基板	253
7.5	挑战	254
7.5.1	无芯基板	254
7.5.2	沟槽基板	255
7.5.3	超低热膨胀系数基板	257
7.5.4	堆叠芯片基板	258
7.5.5	光波导基板	260
7.6	陶瓷基板	261
7.7	路线图	262
7.7.1	日本电子与信息技术工业协会路线图	262
7.7.2	国际半导体技术路线图	263
7.8	总结	264
	参考文献	264
第 8 章	IC 封装系统集成设计	266
8.1	集成的芯片封装系统	268
8.1.1	引言	268
8.1.2	设计探索	269
8.1.3	模拟与分析决策	273
8.1.4	ICPS 设计问题	274
8.2	去耦电容插入	276
8.2.1	引言	276
8.2.2	电学模型	278
8.2.3	阻抗矩阵及其增量计算	280
8.2.4	噪声矩阵	282
8.2.5	基于模拟退火算法的去耦电容插入	282
8.2.6	基于灵敏度分析算法的去耦电容插入	286
8.3	TSV 3D 堆叠	296
8.3.1	3D IC 堆叠技术	296
8.3.2	挑战	298
8.3.3	解决方法	302
8.4	总结	316
	参考文献	316
第 9 章	倒装芯片封装的热管理	323
9.1	引言	324
9.2	理论基础	325

9.2.1	传热理论	325
9.2.2	电热类比模型	327
9.3	热管理目标	328
9.4	芯片与封装水平的热管理	330
9.4.1	热管理示例	330
9.4.2	芯片中的热点	331
9.4.3	热管理方法	336
9.5	系统级热管理	338
9.5.1	热管理示例	338
9.5.2	热管理方法	340
9.5.3	新型散热技术	348
9.6	热测量与仿真	357
9.6.1	封装温度测量	358
9.6.2	温度测量设备与方法	358
9.6.3	温度测量标准	359
9.6.4	简化热模型	359
9.6.5	有限元/计算流体力学仿真	360
	参考文献	362
第 10 章	倒装芯片封装的热机械可靠性	367
10.1	引言	368
10.2	倒装芯片组件的热变形	369
10.2.1	连续层合板模型	370
10.2.2	自由热变形	371
10.2.3	基于双层材料平板模型的芯片应力评估	372
10.2.4	芯片封装相互作用最小化	374
10.2.5	总结	377
10.3	倒装芯片组装中焊锡凸点的可靠性	377
10.3.1	焊锡凸点的热应变测量	377
10.3.2	焊锡材料的本构方程	378
10.3.3	焊锡接点的可靠性仿真	384
10.3.4	下填料粘接强度对焊锡凸点可靠性的影响	387
10.3.5	总结	389
	参考文献	389
第 11 章	倒装芯片焊锡接点的界面反应与电迁移	391
11.1	引言	392
11.2	无铅焊料与基板的界面反应	393
11.2.1	回流过程中的溶解与界面反应动力学	393
11.2.2	无铅焊料与 Cu 基焊盘的界面反应	397

11.2.3	无铅焊料与镍基焊盘的界面反应	398
11.2.4	贯穿焊锡接点的 Cu 和 Ni 交叉相互作用	403
11.2.5	与其他活泼元素的合金化效应	405
11.2.6	小焊料体积的影响	409
11.3	倒装芯片焊锡接点的电迁移	412
11.3.1	电迁移基础	413
11.3.2	电流对焊料的作用及其引发的失效机理	415
11.3.3	电流对凸点下金属化层 (UBM) 的作用及其引发的失效机理	421
11.3.4	倒装芯片焊锡接点的平均无故障时间	426
11.3.5	减缓电迁移的策略	429
11.4	新问题	431
	参考文献	431
附录	439
附录 A	量度单位换算表	440
附录 B	缩略语表	443

第 1 章

市场趋势：过去、现在和将来

Robert Lanzone

Advanced Packaging and Wafer Level Development at Amkor Technology Inc,
1900 South Price Road, Chandler, AZ 85286, USA

- | | |
|------------------------|-----------------------------|
| 1.1 倒装芯片技术及其早期发展 2 | 1.7 倒装芯片的市场驱动力 11 |
| 1.2 晶圆凸点技术概述 2 | 1.8 从 IDM 到 SAT 的转移 13 |
| 1.3 蒸镀 3 | 1.9 环保法规对下填料、焊料、结构设计等的冲击 16 |
| 1.4 晶圆凸点技术总结 6 | 1.10 贴装成本及其对倒装芯片技术的影响 16 |
| 1.5 倒装芯片产业与配套基础架构的发展 7 | 参考文献 16 |
| 1.6 倒装芯片市场趋势 9 | |