



航天科技图书出版基金资助出版

复杂的引线键合 互连工艺

[印] 沙帕拉·K·普拉萨德 著
刘亚强 译

拱丝

喂料孔

内部斜面

外部半径
和表面

 Springer



中国宇航出版社

航天科技图书出版基金资助出版

复杂的引线键合互连工艺

[印] 沙帕拉·K·普拉萨德 著

刘亚强 译



中国宇航出版社

·北京·

Translation from English language edition:
Advanced Wirebond Interconnection Technology
by Shankara K. Prasad
Copyright © 2004 Springer New York
Springer New York is a part of Springer Science+Business Media
All Rights Reserved

本书中文简体字版由著作权人授权中国宇航出版社独家出版发行,未经出版者书面许可,不得以任何方式抄袭、复制或节录本书中的任何部分。

著作权合同登记号:图字:01-2015-2224号

版权所有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

复杂的引线键合互连工艺 / (印) 普拉萨德

(Prasad, S. K.) 著; 刘亚强译. -- 北京: 中国宇航出版社, 2015.9

书名原文: ADVANCED WIREBOND INTERCONNECTION TECHNOLOGY

ISBN 978-7-5159-0986-8

I. ①复… II. ①普… ②刘… III. ①引线技术-键合工艺-互连工艺 IV. ①TN405.96

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 214803 号

责任编辑 侯丽平

责任校对 祝延萍

封面设计 文道思

出版发行 **中国宇航出版社**

社址 北京市阜成路8号 邮编 100830
(010)60286808 (010)68768548

网址 www.caphbook.com

经销 新华书店

发行部 (010)60286888 (010)68371900
(010)60286887 (010)60286804(传真)

零售店 读者服务部
(010)68371105

承印 北京画中画印刷有限公司

版次 2015年9月第1版

2015年9月第1次印刷

规格 787×1092

开本 1/16

印张 28.25

字数 705千字

书号 ISBN 978-7-5159-0986-8

定价 200.00元

本书如有印装质量问题,可与发行部联系调换

航天科技图书出版基金简介

航天科技图书出版基金是由中国航天科技集团公司于2007年设立的，旨在鼓励航天科技人员著书立说，不断积累和传承航天科技知识，为航天事业提供知识储备和技术支持，繁荣航天科技图书出版工作，促进航天事业又好又快地发展。基金资助项目由航天科技图书出版基金评审委员会审定，由中国宇航出版社出版。

申请出版基金资助的项目包括航天基础理论著作，航天工程技术著作，航天科技工具书，航天型号管理经验与管理思想集萃，世界航天各学科前沿技术发展译著以及有代表性的科研生产、经营管理译著，向社会公众普及航天知识、宣传航天文化的优秀读物等。出版基金每年评审1~2次，资助10~20项。

欢迎广大作者积极申请航天科技图书出版基金。可以登录中国宇航出版社网站，点击“出版基金”专栏查询详情并下载基金申请表；也可以通过电话、信函索取申报指南和基金申请表。

网址：<http://www.caphbook.com>

电话：(010) 68767205, 68768904

献给：

我的小学老师 K·戈帕拉查 (K. Gopalachar)。

高中老师 H·L·拉马钱德拉·夏斯特里 (H. L. Ramachandra Shastri) 和 P·N·文卡塔纳拉亚纳 (P. N. Venkatanarayana)。

大学老师 H·N&T·阿什瓦沙·纳拉亚纳·拉奥 (H. N. & T. Ashwatha Narayana Rao) 博士。

研究生导师 E·C·苏马·拉奥 (E. C. Subba Rao) 博士，赫伯特·赫尔曼 (Herbert Herman) 教授和艾伦·戈兰 (Alan Goland) 博士。

为这些人在我成长中的付出

我的父母，姐妹莎伊拉贾 (Shailaja) 及莱莎 (Latha) 和兄弟贾格迪什 (Jagadish)。

为他们的支持和爱

以及我的妻子拉莉莎 (Lalitha)。

为在追逐我的梦想时热情的同伴

译者序

微电子组装中，引线键合作为一门复杂的组装和制造工艺技术，是提高通用微电子器件、专用集成电路、薄厚膜混合集成电路、多芯片组装、系统集成电路等微电子电路性能的关键技术，是实现微电子互连的核心技术。由此可见，这方面的专业论述或著作，对于学习和掌握微电子封装和制造的核心技术有极大帮助。

译者于2009年第一次看到这本书的英文版，后来得知是本单位的王俊峰同志提供的，在此致谢。译者虽然在本行业从事工艺工作多年，也略有心得，但从未接触过系统的关于键合工艺的论述和著作，以前接触的都是一些零散的资料，不成体系，许多相关的问题也找不到确切症结。记得初次看到此书时，如获至宝，读完之后意犹未尽，想到这方面资料的匮乏，遂决定将它译成中文，以供行业人士借鉴。

本书在第1章绪论中主要介绍了键合的类型及当前发展的方向。在第2章引线键合的材料中，讲述了在需要高电流、低拱丝、叠层芯片和长拱丝的应用中键合引线有何需求并讲述了键合引线是如何被制造的，以及上游加工在封装组装工业的实际键合中有怎样的影响。在对引线质量测试的讨论中，概述了质量测试的许多不同方法，任何一种方法都能验证出适合于生产使用的引线。在第3章键合设备中详细讨论了对于细间距引线键合需要何种性能的引线键合设备，如何为特定封装应用选择合适的键合设备类型，如何对引线键合机的物主做成本分析，如何对引线键合机进行性能评价以及采用怎样的维护方法。在第4章加工工艺中，讲述了影响被键合器件的产量、质量和可靠性的各种因素，以及介绍了每种变量的影响和变量之间的相互影响。在第5章质量中，讲述了键合拉力测试、键合剪切力测试和目检的方法，在此章中也分析了各种测试的适用性、优点和局限性。在第6章可靠性中，探讨了紫斑、尖刺、露底、倒线、腐蚀以及踵裂这类主要的可靠性失效现象；除此之外，也讨论了芯片粘接焊盘位移失效、过电流失效、晶粒生长失效、镀银引脚的铝键合失效、铝银腐蚀和金银问题等其他可靠性问题。在第7章引线键合的新工艺和新用途中，概述了某些新的应用，如光电子应用和芯片叠层封装中引线键合的使用等。

另外，在本书的翻译过程中，一些英文名词的中文翻译因地区差异可能有不一致的地方，在文中采用了我们多年的习惯叫法，望读者谅解。对于之前没有出现过相关中文翻译的英文名词，我们也力求准确地表达出来，希望大家接受。

感谢西安微电子技术研究所领导对本书出版工作的支持。衷心地感谢狄刘俊、郝云对本书翻译工作的支持。感谢李新龙、薛鹏斌、董进在出版工作中的协助。感谢刘建军、李克忠、杨百祥、孟颖悟对本书的大力推荐。感谢出版社的领导和工作人员的大力支持，特

别要感谢本书的责任编辑侯丽平女士对本书悉心的编辑校对和认真审核。最后，感谢我的父母和家人，不论风雨，与我同在。

由于译者本人的能力有限，且相当多的专业词汇没有可借鉴的中文译法，译文中难免会有不妥之处，望读者批评指正。

西安微电子技术研究所 刘亚强

2014年12月10日于西安

前 言

半导体器件工业的市场规模接近 2 000 亿美元，支持着顶层上 10 000 亿美元的全球电子市场。半导体器件几乎是所有产品的骨架，它应用于我们生活的各个方面。每年估计有 600 亿个半导体、光电子和 MEMS 器件封装在塑料和密闭的封装体内，而其中超过 90% 的封装是通过引线键合完成的。通过计算表明，每年我们生产接近 5 万亿个引线键合点，而由于人类对越来越多的电子产品和自动控制产品的依赖，这个数量将继续增长。

我们这些从事于封装工艺发展和组装制造领域的，特别是引线键合方面的人，深知引线键合在影响产品质量和竞争力方面的巨大作用。在本书中，尝试着从制造方面和可靠性前景方面阐述引线键合。本书分析和探索了在引线键合过程中达到六西格玛需要考虑的各种因素。这些因素包括设计、材料、加工处理、设备、品质测试和可靠性工程，以及最末但必不可少的：操作培训。

尽管目前已经有许多关于引线键合的书籍和报告，然而本书的目标是参照许多有益的从业经验及相关的研究工作，以读者可理解的方式呈现它，读者对象可以是广大从事于芯片设计、封装设计、晶片生产、组装工艺、制造工程、设备工业、软件工程、质量工程、可靠性工程、采购、维修工程、工业工程、失效分析，以及新技术发展这类工作的人员。引线键合技术位于各学科领域的边缘，本书也期望吸引其他引线互连技术相关领域的读者。

本书期望成为一个全面的信息和知识的来源，既能够帮助此领域的新手，也能够帮助一个急需资料对工艺问题做出决定的老手。本书不仅介绍了如何设计一个键合焊盘或一个引出脚、怎样选择一种键合引线、怎样设计一种劈刀以及工厂中键合工艺的优化，而且书中也解释了为什么要采用这种方式来做。因为，在任何加工过程中达到六西格玛，不仅需要每个人知道怎样做适当的事，而且需要知道为什么采用那种方式去做。

为了使本书在学术上尽可能地准确和最新，并以广大工程技术人员可理解的形式呈现信息，我们做了最大的努力。本书涵盖了理论知识和实际应用，因为它构建了一个了解引线键合技术的强大基础，这将帮助达到制造工艺和可靠性的更高水平。

在引线键合技术发展的早期，许多研究和进展是由 R&D 组织以及半导体公司来完成的。今天，大多数技术进展由供应商完成，也有一些案例是与 R&D 组织协作完成的。组装制造业公司和半导体公司严重依赖供应商提供的信息，供应商提供材料、设备以及加工方法的支持。在本书的创作中，也非常依赖供应商提供的材料和设备的信息。信息的来源有他们的产品目录、技术手册、技术研讨会、私人讨论以及学术会议。但希望告知读者的

是，本书使用的任何公司的信息，既不是推荐他们的产品也不是认可他们的工艺。建议读者使用这些信息在选择键合材料、设备或加工方法时做出更好的判断。

一名在组装工厂工作的引线键合工程师，需要不断学习新的知识技能，以在键合加工中达到六西格玛标准。这种知识技能必然是跨学科的，包括引线键合设计、键合材料、晶片金属化、钝化、键合设备技术、加工工艺、质量测试和可靠性问题等。为了从材料、机器、方法学以及操作等方面描述引线键合过程，本书采用了一个新的信息和知识管理(KM)系统。基于在此研究领域的实践经历，本书中所采用的用来讨论每个主题的这个系统，是引线键合从业者所需的资讯方式。KM系统的庞大格式在随后的章节中被描述。

例如，在为特殊封装确定所应用的引线键合材料时，必须知道适合那种应用的材料的要求。这些要求可能许多材料都能满足，工程师可以从中进行选择。此外，工程师必须知道所选材料是如何制造的，以确保键合材料的制造加工(上游加工)不会影响在特殊应用时的引线键合过程或引线键合的可靠性。引线键合材料的测试必须基于标准的质量测试方法，测试内容是由供应商和使用厂家规定的质量要求，这些测试方法必须明确地被定义和执行。

同样的，对应用于特定键合需求的设备必须被指定。适合的引线键合设备必须在标准和可供选择的基础上进行选择。设备性能必须根据该应用进行充分的评估。加工成本和设备成本必须进行计算。设备的校准和维修制度必须明确地制定和执行。

从加工角度来说，在器件进行键合前必须明确建立工艺规范。必须清楚地了解每一个工艺变量的影响。最佳的工艺方法必须详细说明以及在用于生产前工艺必须最优化。最优化的工艺必须由统计过程控制技术来约束。工艺参数必须使用监控技术来校准和监测。必须了解加工机理以达到高加工可靠性和产品可靠性。芯片和封装要进行可制造性的设计，设计规则必须建立且其能覆盖器件设计所涉及的每一种可想到的变量。加工问题以及相应的解决方法必须系统地记录在案。

质量测试方法必须与测试方式、测试变量、失效模式、干涉、测试应用和应用的局限性共同被记录。设计和制造的完美是可靠性的重要保证。书中叙述了影响器件可靠性的不同问题和要点，以及克服这些可靠性问题所建议使用的方法。

读者可能会注意到，类似 mil 和 μm 这样的单位可能在同一章节中出现。同时使用 SI 单位和英制单位是令人无奈的，这是由于大部分美国公司和一些子承包商仍然在使用后者，工程师们交替地使用这两种单位。对于力的描述，gf 的单位被使用，同时在一些场合 mN 的单位也被用到。被复制的图表和图形中的单位与原创出版时的单位相同。相信这些信息将更多地被工作在这一领域的专业人士所接受和理解，如果这些单位是他们认可的。

感 谢

如果没有苏达·拉奥 (Sudha Rao) 女士的个人参与和贡献, 就不会有本书。她不辞辛苦地对书中内容进行润色修改, 使本书不仅在语言文字上准确, 而且在版式上也非常漂亮, 她对内容细节的关注值得我真诚的欣赏和感谢, 感谢苏达使此书成为现实。

感谢我们公司的同事, 他们在文献检索、制作图表、软件完善和文献准备中都作出了极大的贡献。我特别感谢的是: 安比卡·拉奥 (Ambika Rao)、拉玛·文卡特斯赫 (Rama Venkatesh)、凯沙夫·普拉萨德 (Keshav Prasad)、萨维莎·约伊斯 (Savitha Jois)、雷姆斯赫·钱德拉 (Ramesh Chandra)、阿洛克·埃尔汉斯 (Alok Elhance) 和乌马尚卡 (Umashankar)。

衷心感谢所有那些为本书完成作出贡献的人, 是他们提供了很多技术资料。我曾与来自半导体公司的许多工程师和管理人员、材料销售商、设备供应商, 以及我的学生一起讨论问题。可是我尤其感谢与我的两位朋友的互动: ST 微电子的阿里·萨布 (Ali Sabui) 先生, 我与他在 20 世纪 90 年代初的一个引线键合项目中相遇; 拉玛·舒克拉 (Rama Shukla) 博士, 同他一道在 20 世纪 80 年代中期第一次开创了封装课程。他们两人在鼓舞我对引线键合互连工艺上的兴趣都有帮助。

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 引线键合工艺	3
1.1.1 热超声球键合	3
1.1.2 超声楔形键合	5
1.2 球-楔键合的优点	5
1.2.1 热超声球-楔键合的缺点	6
1.3 铝楔形键合的优点	7
1.3.1 铝楔形键合的缺点	7
1.4 热压键合	7
1.5 三种键合工艺的比较	7
1.6 超细间距引线键合	8
1.6.1 超细间距键合中的挑战	9
第 2 章 引线键合的材料	11
2.1 键合引线材料的要求和性质	11
2.1.1 键合引线的要求	11
2.1.2 高电导率	12
2.1.3 高电流负载能力	15
2.1.4 高抗张强度和可控的延伸率	17
2.1.5 应力应变曲线	18
2.1.6 断裂负载	19
2.1.7 可控的延伸率	19
2.1.8 掺杂元素及其在机械性质上的影响	22
2.1.9 引线的晶粒尺寸	24
2.1.10 热膨胀系数的兼容性	25
2.1.11 引线键合加工的生产率	26
2.1.12 气密性封装的键合引线	26
2.1.13 抗腐蚀性	26
2.1.14 器件键合焊盘的尺寸	26

2.2 引线材料的选择	27
2.2.1 键合引线材料的选择	27
2.2.2 金合金对机械性能的改善	27
2.2.3 适用于细小间距应用的金引线	30
2.2.4 低拱丝高度应用的引线选择	31
2.2.5 作为键合引线材料的铝和铝合金	35
2.2.6 添加1%硅的铝	35
2.2.7 铝-镁引线	36
2.2.8 金引线的替代品	36
2.2.9 铜引线	37
2.3 引线制造	39
2.3.1 金和铝键合引线的制造	39
2.3.2 金属精炼	39
2.3.3 熔化和铸造	39
2.3.4 拉制	40
2.3.5 静液力挤压	41
2.3.6 退火	42
2.3.7 缠绕和制轴	42
2.3.8 高速自动引线键合机的绕轴	43
2.3.9 键合引线的质量保证	45
2.3.10 引线的存储	48
2.3.11 保存期限	49
2.4 键合引线的质量	51
2.4.1 拉制引线的化学分析和表面清洁	51
2.4.2 铝合金中硅分布的控制	52
2.5 测试方法和规范	53
2.5.1 机械性能测试	53
2.5.2 SEM 作为断裂模式分析的一个诊断工具	54
2.5.3 目检	56
2.5.4 线径测量法	56
第3章 键合设备	58
3.1 设备性能要求	58
3.1.1 键合放置精度和可重复性	59
3.1.2 焊球的控制	66
3.1.3 拱丝的控制	68
3.1.4 供料系统	71

3.1.5	程序的传递或可移植性	72
3.1.6	成品率	73
3.1.7	键合的产量	73
3.1.8	换能器技术	74
3.1.9	离线编程 (OLP)	78
3.2	设备的选择和采购	80
3.2.1	定义需求	80
3.2.2	市场调研	81
3.2.3	编写采购说明	81
3.2.4	运行性能测试	82
3.2.5	撰写采购键合机的评估	82
3.2.6	怎样撰写设备要求说明书?	82
3.2.7	设备选择的优先顺序矩阵分析法	85
3.2.8	怎样使用优先顺序矩阵分析法?	85
3.3	物主成本	86
3.3.1	引线键合设备成本效益选择的标准	86
3.3.2	什么是物主成本?	87
3.3.3	CoO 计算的参数	87
3.3.4	物主成本软件	89
3.3.5	物主成本分析的实用性	89
3.4	设备性能	89
3.4.1	键合机的性能评价	89
3.4.2	键合机评价队伍	90
3.4.3	键合机评价计划	90
3.4.4	引线键合机的性能评定	91
3.4.5	现存封装的加工能力	92
3.4.6	未来封装的加工能力	92
3.4.7	机器能力	93
3.4.8	机器功能	94
3.4.9	供应商的潜力和服务	96
3.4.10	来自工厂各级职员的评价	96
3.4.11	得分调查表	97
3.4.12	决策	97
3.5	设备维护	98
3.5.1	建立一个维护计划	98
3.5.2	待机时间	99

3.5.3	不定期停机时间	99
3.5.4	定期停机时间	100
3.6	预防性维修计划	100
第4章	加工工艺	101
4.1	工艺参数	101
4.1.1	键合参数	102
4.1.2	键合力	103
4.1.3	键合期间的超声能量	104
4.1.4	键合温度	113
4.1.5	键合时间	114
4.1.6	拱丝参数	115
4.1.7	键合焊盘的金属层	119
4.1.8	铝和铝合金	121
4.1.9	下层金属层	125
4.1.10	键合焊盘金属层的微结构	126
4.1.11	合金元素及其对键合能力的影响	127
4.1.12	键合焊盘金属层的新型铝合金	128
4.1.13	焊盘金属层的替换	129
4.1.14	金属层淀积技术	130
4.1.15	钝化刻蚀	131
4.1.16	键合焊盘污染	133
4.1.17	芯片金属层表面可键合性特征评价的方法	133
4.1.18	铝键合焊盘的硬度测量	134
4.1.19	引线框架和基板的金属层	136
4.1.20	基板金属层的加工	140
4.1.21	镀膜的形态	143
4.1.22	基板金属层的替换	144
4.1.23	基板金属层质量的特征	147
4.1.24	膜层性质对键合的影响	147
4.1.25	膜层缺陷的目检	152
4.1.26	作为工艺参数的键合引线	155
4.1.27	引线类型	156
4.1.28	引线尺寸	156
4.1.29	引线直径对结球的影响	156
4.1.30	引线直径对剪切力的影响	159
4.1.31	引线直径对断裂负载的影响	159

4.1.32	引线直径对颈部强度的影响	159
4.1.33	引线的一致性	161
4.1.34	引线线轴的影响	161
4.1.35	引线的表面状况	162
4.1.36	第二货源及其影响	162
4.1.37	焊球接触直径	162
4.1.38	键合工具	162
4.1.39	键合工具的选择	163
4.1.40	劈刀尺寸	163
4.1.41	劈刀顶部直径	164
4.1.42	劈刀孔及其作用	166
4.1.43	斜面直径和斜面角度	167
4.1.44	表面角度	170
4.1.45	劈刀的外部半径	172
4.1.46	劈刀的形状	172
4.1.47	细长劈刀	174
4.1.48	劈刀材料	174
4.1.49	采用 CNC 加工的劈刀制造	176
4.1.50	陶瓷注模 (CIM) 加工	177
4.1.51	陶瓷注模加工的优点	178
4.1.52	劈刀材料选择的标准	178
4.1.53	劈刀的表面加工	179
4.1.54	劈刀损伤	180
4.1.55	超声键合的楔入工具	180
4.1.56	后缘半径	181
4.1.57	楔形面	183
4.1.58	深腔键合	184
4.1.59	反向键合	185
4.1.60	引线喂料及其在键合位置上的影响	186
4.1.61	楔形工具用材料	187
4.1.62	最终表面	187
4.1.63	其他楔形工具	190
4.1.64	其他影响键合的因素	191
4.1.65	键合设备和工作台	191
4.1.66	图形识别系统	191
4.1.67	EFO 一致性	192

4.1.68	引线喂料的一致性	194
4.1.69	精确的接触探测和挤压控制	195
4.1.70	同步	195
4.1.71	设置的稳定性	195
4.1.72	软件相关的程序缺陷	196
4.1.73	键合缺失检测器	196
4.1.74	加热部件	196
4.1.75	引线框架夹具	196
4.1.76	工具谐振	197
4.1.77	专用键合工具的特点	200
4.1.78	热压键合	200
4.1.79	影响 COB 封装的加工参数	200
4.1.80	操作人员技能	202
4.2	工艺优化	203
4.2.1	工艺优化的目的	203
4.2.2	金球键合的最优化	205
4.2.3	结球的最优化	206
4.2.4	试验的设计	206
4.2.5	铝楔形键合的最优化	211
4.2.6	最优化第二键合	212
4.3	工艺控制	219
4.3.1	键合拉力	219
4.3.2	控制图表的使用	220
4.3.3	作为可测量特征的键合拉力	221
4.3.4	创建控制图表	223
4.3.5	计算 \bar{X} 图表和 R 图表参数的步骤	225
4.3.6	控制图表的说明	225
4.3.7	用键合剪切强度控制工艺	226
4.3.8	目检	226
4.3.9	金属间化合物面积的测量	227
4.3.10	键合刻蚀	227
4.3.11	加工能力 (C_{pk}) 分析	228
4.4	工艺监测	228
4.4.1	监测键合响应	228
4.4.2	超声频率控制和监测	230
4.4.3	键合工具振动强度测量	230

4.4.4	电容扩音技术	230
4.4.5	阻抗测量系统	231
4.4.6	使用激光干涉法的超声波测试	231
4.4.7	使用光学传感器的楔形工具振动强度测量	232
4.4.8	负载对工具振动模式的影响	233
4.4.9	键合力监测	235
4.4.10	键合时间监测	235
4.4.11	其他键合监测技术	235
4.4.12	西门子过程监测法	236
4.4.13	温度监测	238
4.5	加工机理	241
4.5.1	超声波键合	241
4.5.2	工具对焊接强度的影响	244
4.5.3	热压的机理	246
4.6	对可键合能力的设计	251
4.6.1	芯片设计规则	252
4.6.2	焊盘设计规则	253
4.6.3	通过引线的最大容许电流	260
4.6.4	封装和组装设计指南	264
4.6.5	拱丝高度的设计	267
4.6.6	交错焊盘的布局设计	270
4.6.7	引线交叉	272
4.6.8	由于芯片位移的引线交叉	272
4.6.9	引线长度规则	275
4.6.10	键合设计和封装兼容性	277
4.6.11	键合直径偏离焊盘的百分比	277
4.6.12	为键合考虑的引线框架设计	277
4.6.13	包括键合能力的封装设计软件	280
4.7	加工问题和解决方法	280
4.7.1	焊球在键合焊盘上不粘连 (键合脱离)	281
4.7.2	在引脚上焊接的不粘连 (焊接脱离)	281
4.7.3	焊球在焊盘上的位置	283
4.7.4	楔形焊在引脚上的位置	283
4.7.5	引线塌陷	284
4.7.6	引线残尾	285
4.7.7	键合期间的引线断裂	285