

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

Through-Silicon Vias for 3D Integration

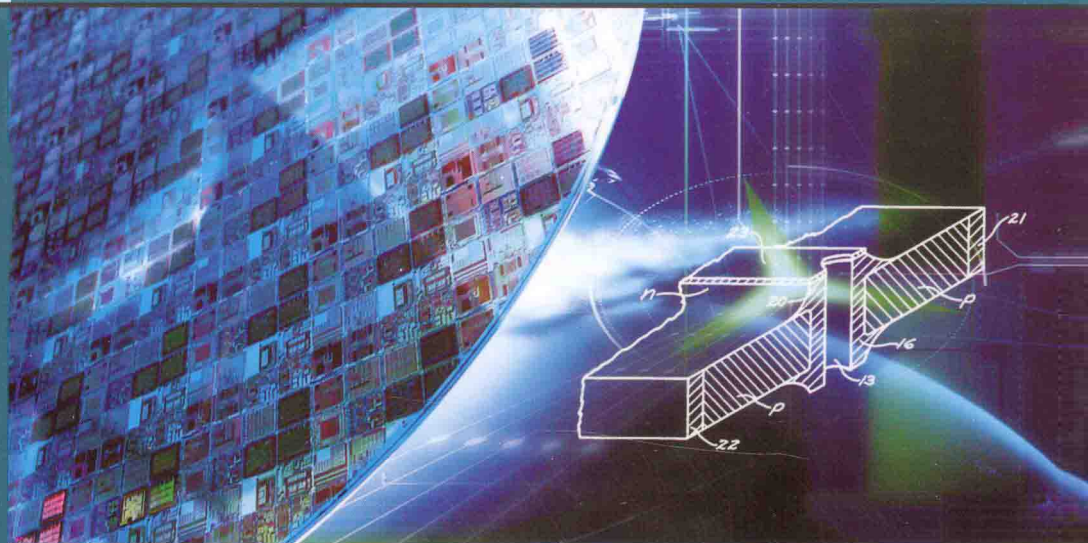
三维电子封装的 硅通孔技术

【美】刘汉诚 (John H. Lau) 著



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

组织译审



化学工业出版社


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


Through-Silicon Vias for 3D Integration


三维电子封装的 硅通孔技术

【美】刘汉诚 (John H. Lau) 著 

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

组织译审 

秦飞 曹立强 译 

朱文辉 审 



化学工业出版社

内 容 提 要

本书系统讨论了用于电子、光电子和微机电系统 (MEMS) 器件的三维集成硅通孔 (TSV) 技术的最新进展和可能的演变趋势, 详尽讨论了三维集成关键技术中存在的主要工艺问题和潜在解决方案。首先介绍了半导体工业中的纳米技术和三维集成技术的起源和演变历史, 然后重点讨论 TSV 制程技术、晶圆减薄与薄晶圆在封装组装过程中的拿持技术、三维堆叠的微凸点制作与组装技术、芯片与芯片键合技术、芯片与晶圆键合技术、晶圆与晶圆键合技术、三维器件集成的热管理技术以及三维集成中的可靠性问题等, 最后讨论了具备量产潜力的三维封装技术以及 TSV 技术的未来发展趋势。

本书适合从事电子、光电子、MEMS 等器件三维集成的工程师、科研人员和技术管理人员阅读, 也可以作为相关专业大学高年级本科生和研究生教材和参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

三维电子封装的硅通孔技术/[美] 刘汉诚著; 秦飞, 曹立强译. —北京: 化学工业出版社, 2014.5

(电子封装技术丛书)

书名原文: Through Silicon Vias for 3D Integration

ISBN 978-7-122-19897-6

I. ①三… II. ①刘…②秦…③曹… III. ①电子器件-封装工艺 IV. ①TN605

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 036735 号

Through-Silicon Vias for 3D Integration/by John Lau

ISBN 9780071785143

本书中文简体字版由原著者 John H. Lau 博士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: 01-2013-8575

责任编辑: 吴 刚

文字编辑: 孙 科

责任校对: 宋 玮

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: 北京云浩印刷有限责任公司

装 订: 三河市前程装订厂

710mm×1000mm 1/16 印张 25 $\frac{3}{4}$ 字数 533 千字 2014 年 7 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: 148.00 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 杨玉良 许居衍
于寿文 龚 克 段宝岩 王 曦 汪 敏
徐晓兰

主 任：毕克允

副主任：汤小川 秦 飞 张蜀平 武 祥

编 委：(以姓氏笔画为序)

丁冬雁	万里兮	马莒生	王 红	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
李维平	汤小川	杨士勇	杨银堂	杨崇峰
杨道国	肖 斐	肖胜利	张 弓	张 宏
张小建	张国旗	张建华	张蜀平	陈长生
武 祥	尚金堂	罗 乐	郑宏宇	郑学军
郑晓光	赵 宁	赵元富	贵大勇	禹胜林
秦 飞	柴广跃	柴志强	恩云飞	徐忠华
郭永兴	陶建中	曹立强	韩江龙	程 凯
赖志明	蔡 坚	樊学军		

译 序

集成电路产业作为国民经济和社会发展的战略性、基础性和先导性产业，具有极强的创新能力和融合力，已经渗透到人民生活、生产以及社会安全的方方面面。拥有强大的集成电路技术和产业，已成为迈向创新性国家的重要标志。特别是当前云计算、物联网、移动互联网等成为各界关注和投资的热点，没有强大的集成电路产业作为支撑和基础，这些战略性新兴产业无疑是建立在流沙基础之上，产业发展可能面临“空芯化”的局面。迄今为止集成电路技术一直沿着摩尔定律卓有成效地发展，但随着 32nm 以下线宽技术在单一芯片集成、高密度和多功能等方面进展越来越困难，成本也越来越高，于是出现了新的解决方案，即超越摩尔定律。

三维（3D）集成技术是目前被认定为超越摩尔定律可持续实现小型化、高密度、多功能化的首选解决方案，而硅通孔（TSV）技术，则被认为是三维（3D）集成的核心，即是三维硅（3D Si）集成技术和三维芯片（3D IC）集成技术的关键。TSV 技术具有六大关键工序，可实现芯片与芯片间距离最短、间距最小的互连，与引线键合互连相比有六大优点。

为了适应我国日新月异的电子封装业的发展，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，丛书编辑委员会已先后组织编写、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）共八本书籍。《三维电子封装的硅通孔技术》一书是这一系列丛书中第九本。正在编写中的系列丛书之五《光电子封装》，也将于近期出版，以飨读者。

本书译自 John H. Lau（刘汉诚）博士编写的“Through-Silicon Vias for 3D Integration”，该书的内容涉及半导体技术产业中的纳米技术和三维集成技术的起源和演变历史，并重点讨论 TSV 制作技术、晶圆减薄与薄晶圆在封装过程中的拿持技术、晶圆与晶圆键合技术、三维器件集成的热管理技术及三维集成中的可靠性问题等。最后讨论了量产三维封装技术及 TSV 未来发展趋势。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、相关师生也具有一定的参考价值。

我相信本书中译本的出版发行将对我国电子封装产业及系统级集成技术的发展起到积极的推动作用。在本书的翻译出版过程中，长期从事电子封装技术研究的秦飞教授、朱文辉博士、曹立强博士做了许多工作，在此表示由衷的谢意。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出版社工作人员，表示衷心的感谢！

A handwritten signature in black ink, reading '马克俊' (Ma Kejun). The characters are written in a cursive, flowing style.

译者的话

摩尔定律自 1965 年被提出以来，一直卓有成效地指引电子器件技术的发展方向。但随着 32nm 以下线宽技术的出现，使人们日益认识到在单一芯片集成更高密度的电路和实现更多的功能越来越困难，成本也越来越高，于是出现了“超越摩尔 (More than Moore)”的呼声。三维 (3D) 集成技术目前被认定为是超越摩尔定律，持续实现器件小型化、高密度、多功能化的首选解决方案，而硅通孔 (TSV) 技术则被认为是 3D 集成的核心。近年来越来越多的企业和研发机构投入大量人力和物力从事 TSV 及其相关技术的研究，以期在未来的 3D 时代取得竞争优势。这些企业的工程师、研发人员和技术管理人员以及研发机构的科学家都迫切需要深入了解 3D 集成 TSV 及其相关技术，如 TSV 制程、晶圆减薄与拿持技术、3D 堆叠的微凸点技术、芯片到芯片键合技术、芯片到晶圆键合技术、晶圆到晶圆键合技术以及 3D 集成中遇到的可靠性问题等。

John H. Lau 博士 2013 年出版的英文版专著 “Through-Silicon Vias for 3D Integration” (《三维电子封装的硅通孔技术》) 基于最新的研究成果和发展趋势，系统详尽地讨论了 3D 集成 TSV 技术的关键工艺问题及其潜在的解决方案，内容涵盖了 3D 集成技术领域的几乎所有方面。对于希望掌握 3D 集成 TSV 相关技术的人员来说，该书不可不读。

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的翻译工作。全书由秦飞、曹立强翻译，由秦飞教授统稿，朱文辉博士对全书内容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。北京工业大学先进电子封装技术与可靠性实验室的安彤、夏国峰、别晓锐、王伟、陈思等参与了图片、参考文献资料的整理和翻译工作。

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。对于英文版中采用的英制单位，中文版中未做处理，但以附录的形式给出了英制和国际单位制之间的换算表，以方便读者。考虑到书中大量使用缩略语，中文版以附录形式列出了缩略语表。

书中不妥之处，敬请读者批评指正。

译者

英文版序

三维（3D）集成技术特别是 3D IC 集成技术正席卷半导体工业，主要表现在：（1）3D 集成技术影响芯片制造、集成电路设计、晶圆制造、器件集成制造、封装与测试、材料与设备制造等众多企业，同时也影响大学和研究机构。（2）3D 集成技术吸引了来自全球的研发人员和工程师参加相关的会议、讲座、讨论会和论坛，分享他们的成果、交流信息、学习最新的技术和寻求解决方案，并规划他们的未来。（3）3D 集成技术推动半导体产业建立新的标准、新的产业体系和基础设施。这样的事情是前所未有的。

这是一个完美风暴。业界认为摩尔定律正在谢幕，3D 集成即将登场。为了在将来的竞争中处于优势，众多企业和机构在 3D IC 集成技术研发方面纷纷投入大量人力和物力。3D IC 集成定义为：薄晶圆或转接板通过硅通孔（TSV）和微凸点实现堆叠互连。因此，TSV 制作、薄晶圆或芯片的拿持、微凸点制作、键合技术以及热管理成为 3D IC 集成的关键技术。

然而，大多数工程师、技术管理人员、研发人员以及科学家对于 TSV 制作、薄晶圆的强度测量和拿持、微凸点制作、芯片与芯片（C2C）键合、芯片与晶圆（C2W）键合、晶圆与晶圆（W2W）键合以及 3D 集成相关的可靠性等问题并没有太深入的了解。因此，工业界和研究机构迫切需要一本能全面介绍这些关键技术领域现状的书籍。本书不仅可以使读者尽快了解 3D 集成相关技术的最新发展和趋势，而且可以帮助企业界技术领导人做出关于 3D 集成技术的正确决策。

为达到上述目标，来自电子与光电子研究实验室的 John H. Lau（刘汉诚）博士搜集了大量最新的技术文献，并撰写了《三维电子封装的硅通孔技术》一书。对于半导体工业界、研究机构以及大学来说，这是一本优秀专著。除此以外，对于刚刚进入该领域的人来说，本书提供了 3D IC 集成、3D Si 集成以及 3D IC 封装的入门知识；对于已涉足 3D 集成互连设计与工艺的人员来说，本书可作为了解最新技术发展的参考书。

本书共 11 章，涵盖了 3D 集成技术从基础到最新发展的全部内容。第 1 章简要讨论半导体工业中的纳米技术和 3D 集成技术。第 2 章讲述 TSV 制程的 6 个关键工艺步骤：孔制作、介电层沉积、阻挡层和种子层沉积、孔填充、化学机械抛光和铜外露。第 3 章讨论 TSV 的力学行为、热行为和电学行为。第 4 章和第 5 章分别讨论薄晶圆的强度测量和封装组装中的拿持问题。第 6 章讨论微凸点制作、组装以及组装中微凸点的可靠性问题。第 7 章讨论微凸点的电迁移问题。第 8 章讨论 C2C、C2W 和 W2W 的瞬态液相键合技术。第 9 章讨论 3D IC SiP 集成技术中的热管理问题。最后，第 10 章讨论与 3D IC 集成和 3D Si 集成相比成本较低并已接近

量产的竞争性技术，如 3D 封装技术。

本书提供了 3D Si 集成、3D IC 集成、3D IC 封装以及它们在高密度、高性能、低功耗、宽带宽、轻薄以及绿色产品中应用的最新信息。本书对于希望掌握 TSV 技术、薄晶圆强度测量与拿持技术、微凸点技术、封装与组装技术、热管理技术、成本效益设计技术以及高良率制造工艺技术的专业人员来说，是不可或缺的。本书涵盖了 3D 集成这一快速发展技术领域的所有方面。

3D 集成技术能不能像摩尔定律那样成为未来世界所能依赖的基础呢？本书也许不能回答这个问题，但可以帮助电子与光电子设计与制造人员更好地理解我们当前需要做什么、如何回答这个问题、如何规划未来以及如何促成其变为现实。

Ian Yi-Jen Chan (詹益仁) 博士
电子与光电子研究实验室 主任
工业技术研究院 副主席
中国台湾

英文版前言

硅通孔 (TSV) 技术是三维硅 (3D Si) 集成技术和三维芯片 (3D IC) 集成技术的核心和关键。TSV 技术可以实现芯片与芯片间距离最短、间距最小的互连。与引线键合等互连技术相比, TSV 技术的优势包括: (1) 更好的电性能; (2) 更低的功耗; (3) 更宽的带宽; (4) 更高的密度; (5) 更小的外形尺寸; (6) 更轻的质量。

TSV 是一项颠覆性技术。所有的颠覆性技术都要回答的问题是: 它将取代什么技术? 成本如何? 不幸的是, TSV 正试图取代目前高良率、低成本而且最成熟的引线键合技术。制作 TSV 需要 6 个关键工艺: 深反应离子刻蚀 (DRIE) 制作 TSV 孔, 等离子增强化学气相沉积 (PECVD) 制作介电层, 物理气相沉积 (PVD) 制作阻挡层和种子层, 电镀铜 (Cu) 填孔, 化学机械抛光 (CMP) 去除多余 Cu, TSV Cu 外露。可见, 与引线键合相比, TSV 技术十分昂贵! 然而, 正如昂贵的倒装芯片技术一样, 由于其独特优势, 仍然在高性能、高密度、低功耗以及宽带宽产品中得到应用。

3D Si 集成与 3D IC 集成的另外一些关键技术包括薄晶圆的强度测量和拿持, 以及热管理等。3D IC 集成中的关键技术包括晶圆微凸点制作、组装技术以及电迁移问题的处理等。本书将对所有这些方面进行讨论。

本书内容主要有 7 个部分: (1) 半导体工业中的纳米技术和 3D 集成技术 (第 1 章); (2) TSV 技术与 TSV 的力学、热学与电学行为 (第 2 章和第 3 章); (3) 薄晶圆的强度测量与拿持技术 (第 4 章和第 5 章); (4) 晶圆微凸点制作、组装可靠性和电迁移问题 (第 6 章和第 7 章); (5) 瞬态液相键合技术 (第 8 章); (6) 热管理技术 (第 9 章); (7) 3D IC 封装技术 (第 10 章)。本书最后在第 11 章给出了到 2020 年该领域发展趋势的几点想法。

第 1 章简要介绍半导体产业中的纳米技术及其展望, 并给出 3D Si 集成与 3D IC 集成近期的进展、挑战和发展趋势。此外, 还介绍了一些嵌入式 3D IC 集成的例子。

第 2 章详细讨论 TSV 制程的 6 个关键工艺, 简要讨论了 3D Si 集成与 3D IC 集成中的 TSV 工艺。TSV 的力学、热学与电学行为在第 3 章中进行了讨论。

第 4 章介绍用于薄晶圆强度测量的应力传感器的设计、制作和校准, 讨论晶圆背面减薄 (磨削) 对 Cu-low- k 芯片力学行为的影响。用于薄晶圆拿持的临时键合与解键合过程中遇到的问题及其解决方法在第 5 章讨论。对无载体的薄晶圆拿持技术也进行了介绍和讨论。

第 6 章讨论晶圆微凸点制作与组装工艺、细节距无铅焊锡接点的可靠性评估以

及超细节距微凸点遇到的问题。第7章讨论微凸点的电迁移问题及其失效机制。

第8章讨论芯片与芯片(C2C)、芯片与晶圆(C2W)以及晶圆与晶圆(W2W)的低温瞬态多相键合方法。还将讨论用于金属间化合物(IMC)观察的扫描电子显微镜(SEM)、离子束聚焦(FIB)、透射电子显微镜(TEM)、X射线衍射(XDR)、差示扫描量热法(DSC)以及C模态扫描超声显微镜(C-SAM)等仪器。

第9章讨论TSV芯片或转接板对3D IC SiP器件热性能的影响和3D堆叠存储芯片的热性能。此外,还讨论了TSV芯片的厚度对热阻的影响。最后,介绍了用于3D SiP热管理的TSV和流体微通道技术。

第10章给出了阻碍TSV技术量产应用的3D IC封装技术的最新进展,如Cu-low- k 芯片堆叠的引线键合技术、采用焊锡凸点的C2C技术以及采用焊锡凸点的扇出埋入晶圆级封装(WLP)到芯片互连技术。还讨论了引线键合的可靠性问题。

本书的读者设定为:(1)正在或即将从事TSV技术、薄晶圆拿持技术、晶圆焊锡微凸点制作与组装技术、电迁移控制技术、热管理以及低温C2C、C2W、W2W键合技术的研发人员;(2)在研发过程中已经遇到了TSV相关关键技术问题,急于深入了解和解决问题的技术人员;(3)在产品中不得不使用高性能、高密度、低功耗、宽带宽3D集成技术的人。本书还可以作为那些有志于成为未来电子/光电子领域领导者、科学家和工程师的大学高年级本科生和研究生的教材。

应用于3D Si集成和3D IC集成的TSV技术出现了不断增长的挑战性问题的挑战,对于面临这些挑战的人来说,我希望本书能成为他们有价值的参考书。我同样希望本书有助于推动TSV及其相关技术的研发进程,有助于推动TSV技术在3D集成产品中的应用。

掌握了3D集成TSV技术的组织和机构有潜力在电子/光电子产业取得重要进展,并从所研发产品的性能、功能、集成密度、功耗、带宽、品质、尺寸和质量等方面获得利益。希望本书的内容有助于扫清TSV相关技术研发中的路障,避免走弯路,并加速在设计、材料和工艺等方面的研发进程。

John H. Lau (刘汉诚) 博士

致 谢

本书得以出版是许多具有奉献精神的人们共同努力的结果，谢谢他们！特别感谢 McGraw-Hill 出版社的 Bridget Thoreson, Pamela Pelton 和 Stephen Smith, Cenveo 出版社的 Sapna Rastogi 以及 Jame K. Madru, 感谢他们坚定的支持和鼓励。特别感谢 Michael Penn 和 Steve Chapman, 他们帮我实现了出版此书梦想。他们不仅批准和资助了这个项目，而且耐心聆听我一再推迟计划的解释，帮助我解决书稿准备过程中出现的各种问题。与他们一起工作，最终把我混乱的手稿变成精美的印刷品，这实在是令人愉悦和富有成就感的经历。

本书的素材有多种来源，包括个人、公司和组织。我尝试在书中适当的地方通过引用来体现我得到的这些协助，但显然不可能一一列出对本书出版提供帮助的每一个人。虽然如此，我内心充满对他们的真挚谢意。感谢美国机械工程师协会 (ASME) 允许本书使用其会议（如 International Intersociety Electronic Packaging Conference）论文集和会刊（如 Journal of Electronic Packaging）中的部分内容；感谢国际电气电子工程师协会 (IEEE) 允许本书使用其会议（如 Electronic Components and Technology Conference）论文集和会刊（如 Advanced Packaging, Components and Packaging Technologies, and Manufacturing Technology）的部分内容；感谢国际微电子与封装协会 (IMAPS) 允许本书使用其会议（如 International Symposium on Microelectronics）论文集和会刊（如 International Journal of Microcircuits and Electronic Packaging）的部分内容。

感谢我的前雇主，香港科技大学、新加坡微电子研究所 (IME)、安捷伦以及 HPL 公司。他们为我提供了良好的、人性化的工作环境，满足了我对工作的渴望，同时还提升了我的职业声誉。感谢 HPL 公司的 Don Rice 博士、安捷伦公司的 Steve Erasmus 博士、新加坡微电子研究所的 Dim-Lee Kwong 教授、香港科技大学的 Ricky Lee 教授，感谢他们的好意和友谊。感谢台湾电子与光电子研究实验室 (EOL) 主任兼副主席 Ian Yi-Jen 博士，感谢他对我信任、尊重以及对我在台湾工业技术研究院 (ITRI) 工作的支持。最后，感谢我的同事们，与他们富有灵感的讨论为本书增色颇多。他们是：Zhang Xiaowu 博士、C. S. Premachandran 先生、Vincent Lee 先生、V. N. Sekhar 博士、D. Pinjala 先生、Tang Gongyue 博士、Ricky Lee 博士、M. S. Zhang 博士、Y. S. Chan 博士、Sharon Lim Pei-Siang 女士、Vempati Srinivasa Rao 先生、Vaidyanathan Kripesh 博士、Juan Milla 先生、Andy Fenner 先生、于大全博士、Aibin Yu 博士、Navas Khan 先生、Li Ling Yan 博士、Won Kyoung Chou 博士、Seung Wock Yoon 博士、Cheryl Selvanayagam 女士、Chai Tai Chong 先生、Shiguo Liu 先生、Charles Vath 先生、John Doricko 先

生、Germaine Yen 女士、朱文辉博士、Jui-Chin Chen 博士、Ching-Kuan Lee 博士、Tao-Chih Chang 博士、Yu-Min Lin 博士、Chau-Jie Zhan 博士、Pei-Jer Tzeng 博士、Cha-Hsin Lin 博士、Shin-Yi Huang 博士、Chun-Hsien Chien 先生、Chien-Ying Wu 先生、Yu-Chen Hsin 女士、Shang-Chun Chen 先生、Chien-Chou Chen 先生、Hsiang-Hung Chang 先生、Jing-Ye Juang 先生、Wen-Li Tsai 先生、Chia-Wen Chiang 女士、Cheng-Ta Ko 先生、Ra-Min Tain 博士、Heng-Chieh Chien 博士、Sheng-Tsai Wu 先生、Ming-Ji Dai 先生、Yu-Lin Chao 先生、Shyh-Shyuan Sheu 先生、Zhe-Hui Lin 先生、Jui-Feng Hung 先生、Shih-Hsien Wu 先生、Shinn-Juh Lai 先生、Peng-Shu Chen 先生、Li Li 博士、Yu-Hua Chen 博士、Tai-Hung Chen 先生、Chih-Sheng Lin 先生、Tzu-Kun Ku 博士、Wei-Chung Lo 博士和 Ming-Jer Kao 博士。当然，还要感谢我在台湾工业技术研究院、香港科技大学、新加坡微电子研究所、安捷伦、EPS 公司、HPL 公司以及美国圣蒂亚国家实验室的杰出同事们，感谢他们的帮助、坚强支持和富有灵感的讨论。和他们工作和交往是我一生的荣幸和奇遇，从他们那里我学到很多关于生活的智慧，也学到很多先进 IC 封装和三维 IC 集成的技术。

最后，感谢我的女儿 Judy 和我的妻子 Teresa，她们的爱、关心和耐心使我可以静心投入本书的编写工作。她们相信我可以为电子工业做出点贡献，她们的这种信心成为我强大的动力。一想到 Judy、Teresa 和我都很健康，我情不自禁地要感谢上帝的慷慨赐福。

John H. Lau (刘汉诚) 博士

作者简介

John H. Lau (刘汉诚) 博士, 于 2010 年 1 月当选台湾工业技术研究院院士。之前, 刘博士曾作为访问教授在香港科技大学工作 1 年, 作为新加坡微电子研究所 (IME) 所属微系统、模组与元器件实验室主任工作 2 年, 作为资深科学家在位于加利福尼亚的 HPL、安捷伦公司工作超过 25 年。

刘汉诚博士是电子器件、光电子器件、发光二极管 (LED) 和微机电系统 (MEMS) 等领域的著名专家, 多年从事器件、基板、封装和印制电路板 (PCB) 的设计、分析、材料表征、工艺制造、品质与可靠性测试以及热管理等方面工作, 尤其专注于表面贴装技术 (SMT)、晶圆级倒装芯片封装技术、硅通孔 (TSV) 技术、三维 (3D) IC 集成技术以及 SiP 封装技术。

在超过 36 年的研究、研发与制造业经历中, 刘汉诚博士发表了 310 多篇技术论文, 编写和出版书籍 120 多章, 申请和授权专利 30 多项, 并在世界范围内做了 270 多场学术报告。独自或与他人合作编写和出版了 17 部关于 TSV、3D MEMS 封装、3D IC 集成可靠性、先进封装技术、球栅陈列 (BGA) 封装、芯片尺寸封装 (CSP)、载带键合 (TAB)、晶圆级倒装芯片封装、高密度互连、板上芯片 (COB)、SMT、无铅焊料、钎焊与可靠性等方面的教材。

刘汉诚博士在伊利诺伊大学 (香槟校区) 获得理论与应用力学博士学位, 在不列颠哥伦比亚大学获得第一个硕士学位 (结构工程), 在威斯康辛大学 (麦迪逊) 获得第二个硕士学位 (工程物理), 在费尔莱迪金森大学获得第三个硕士学位 (管理科学), 在台湾大学获得土木工程专业学士学位。

刘汉诚博士曾担任多家学术期刊编委。这些期刊包括美国机械工程师协会 (ASME) 会刊 Journal of Electronic Packaging; 美国电气电子工程师协会 (IEEE) 会刊 Components, Packaging, and Manufacturing Technology; Circuit World; Soldering and Surface Mount Technology 等。1990 年至 1995 年, 担任 IEEE 电子元件与技术会议 (ECTC) 主席和技术委员会主席; 1987 年至 1992 年, 担任 International Electronic Manufacturing Technology Symposium 会议主席和技术委员会主席; 1987 年至 2002 年, 为 ASME 冬季年会 Solder Mechanics Symposium 会议组织者; 为 ASME IMECE 2010 3D IC Integration Symposium 会议组织者; 1995 年至 2006 年, 担任 IEEE ECTC 会议论文集出版主席。刘汉诚博士曾服务于 IEEE 元件封装与制造技术 (CPMT) 理事会, 并在过去的 11 年里每年都是理事会最杰出的讲师之一。

刘汉诚博士获得 ASME、IEEE、美国制造工程师协会 (SME) 等协会颁发的多个奖项。刘汉诚博士为 ASME 院士和 IEEE 院士 (1994)。

目 录

第 1 章 半导体工业中的纳米技术和 3D 集成技术	1
1.1 引言	1
1.2 纳米技术	1
1.2.1 纳米技术的起源	1
1.2.2 纳米技术的重要里程碑	1
1.2.3 石墨烯与电子工业	3
1.2.4 纳米技术展望	3
1.2.5 摩尔定律：电子工业中的纳米技术	4
1.3 3D 集成技术	5
1.3.1 TSV 技术	5
1.3.2 3D 集成技术的起源	7
1.4 3D Si 集成技术展望与挑战	8
1.4.1 3D Si 集成技术	8
1.4.2 3D Si 集成键合组装技术	9
1.4.3 3D Si 集成技术面临的挑战	9
1.4.4 3D Si 集成技术展望	9
1.5 3D IC 集成技术的潜在应用与挑战	10
1.5.1 3D IC 集成技术的定义	10
1.5.2 移动电子产品的未来需求	10
1.5.3 带宽和宽 I/O 的定义	11
1.5.4 存储带宽	11
1.5.5 存储芯片堆叠	12
1.5.6 宽 I/O 存储器	13
1.5.7 宽 I/O 动态随机存储器 (DRAM)	13
1.5.8 宽 I/O 接口	17
1.5.9 2.5D 与 3D IC 集成 (无源与有源转接板) 技术	17
1.6 2.5D IC 集成 (转接板) 技术的最新进展	18
1.6.1 用作中间基板的转接板	18
1.6.2 用于释放应力的转接板	20
1.6.3 用作载板的转接板	22
1.6.4 用于热管理的转接板	23
1.7 3D IC 集成无源 TSV 转接板技术的新趋势	23
1.7.1 双面贴装空腔式转接板技术	24

1.7.2	有机基板开孔式转接板技术	25
1.7.3	设计举例	25
1.7.4	带散热块的有机基板开孔式转接板技术	27
1.7.5	超低成本转接板	27
1.7.6	用于热管理的转接板技术	28
1.7.7	用于 LED 和 SiP 封装的带埋入式微流体通道的转接板技术	29
1.8	埋入式 3D IC 集成技术	32
1.8.1	带应力释放间隙的半埋入式转接板	33
1.8.2	用于光电子互连的埋入式 3D 混合 IC 集成技术	33
1.9	总结与建议	34
1.10	参考文献	35
第 2 章	TSV 技术	39
2.1	引言	39
2.2	TSV 的发明	39
2.3	采用 TSV 技术的量产产品	40
2.4	TSV 孔的制作	41
2.4.1	DRIE 与激光打孔	41
2.4.2	制作锥形孔的 DRIE 工艺	44
2.4.3	制作直孔的 DRIE 工艺	46
2.5	绝缘层制作	56
2.5.1	热氧化法制作锥形孔绝缘层	56
2.5.2	PECVD 法制作锥形孔绝缘层	58
2.5.3	PECVD 法制作直孔绝缘层的实验设计	58
2.5.4	实验设计结果	60
2.5.5	总结与建议	61
2.6	阻挡层与种子层制作	62
2.6.1	锥形 TSV 孔的 Ti 阻挡层与 Cu 种子层	63
2.6.2	直 TSV 孔的 Ta 阻挡层与 Cu 种子层	64
2.6.3	直 TSV 孔的 Ta 阻挡层沉积实验与结果	65
2.6.4	直 TSV 孔的 Cu 种子层沉积实验与结果	67
2.6.5	总结与建议	67
2.7	TSV 电镀 Cu 填充	69
2.7.1	电镀 Cu 填充锥形 TSV 孔	69
2.7.2	电镀 Cu 填充直 TSV 孔	70
2.7.3	直 TSV 盲孔的漏电测试	72
2.7.4	总结与建议	73
2.8	残留电镀 Cu 的化学机械抛光 (CMP)	73
2.8.1	锥形 TSV 的化学机械抛光	73

2.8.2	直 TSV 的化学机械抛光	74
2.8.3	总结与建议	82
2.9	TSV Cu 外露	83
2.9.1	CMP 湿法工艺	83
2.9.2	干法刻蚀工艺	86
2.9.3	总结与建议	89
2.10	FEOL 与 BEOL	90
2.11	TSV 工艺	90
2.11.1	键合前制孔工艺	91
2.11.2	键合后制孔工艺	91
2.11.3	先孔工艺	91
2.11.4	中孔工艺	91
2.11.5	正面后孔工艺	91
2.11.6	背面后孔工艺	92
2.11.7	无源转接板	93
2.11.8	总结与建议	93
2.12	参考文献	94
第 3 章	TSV 的力学、热学与电学行为	97
3.1	引言	97
3.2	SiP 封装中 TSV 的力学行为	97
3.2.1	有源/无源转接板中 TSV 的力学行为	97
3.2.2	可靠性设计 (DFR) 结果	100
3.2.3	含 RDL 层的 TSV	102
3.2.4	总结与建议	105
3.3	存储芯片堆叠中 TSV 的力学行为	105
3.3.1	模型与方法	105
3.3.2	TSV 的非线性热应力分析	106
3.3.3	修正的虚拟裂纹闭合技术	108
3.3.4	TSV 界面裂纹的能量释放率	110
3.3.5	TSV 界面裂纹能量释放率的参数研究	110
3.3.6	总结与建议	115
3.4	TSV 的热学行为	116
3.4.1	TSV 芯片/转接板的等效热导率	116
3.4.2	TSV 节距对 TSV 芯片/转接板等效热导率的影响	119
3.4.3	TSV 填充材料对 TSV 芯片/转接板等效热导率的影响	120
3.4.4	TSV Cu 填充率对 TSV 芯片/转接板等效热导率的影响	120
3.4.5	更精确的计算模型	123
3.4.6	总结与建议	125