

信息科学技术学术著作丛书

集成电路三维系统 集成与封装工艺

曹立强 刘丰满 王启东 中文导读
〔美〕 John H. Lau 著

3D IC Integration and Packaging



科学出版社

信息科学技术学术著作丛书

集成电路三维系统集成与封装工艺

3D IC Integration and Packaging

曹立强 刘丰满 王启东 中文导读

〔美〕 John H. Lau 著

科学出版社

北 京

图字:01-2017-1521 号

内 容 简 介

本书系统讨论用于电子、光电子和 MEMS 器件的 2.5D、3D,以及 3D IC 集成和封装技术的最新进展和未来可能的演变趋势,同时详尽讨论 IC 三维集成和封装关键技术中存在的主要工艺问题和可能的解决方案。通过介绍半导体工业中的集成电路发展,以及摩尔定律的起源和演变历史,阐述三维集成和封装的优势和挑战,结合当前三维集成关键技术的发展重点讨论 TSV 制程与模型、晶圆减薄与薄晶圆在封装组装过程中的拿持晶圆键合技术、三维堆叠的微凸点制作与组装技术、3D 硅集成、2.5D/3D IC 和无源转接板的 3D IC 集成、三维器件集成的热管理技术、封装基板技术,以及存储器、LED、MEMS、CIS 3D IC 集成等关键技术问题,最后讨论 PoP、Fan-in WLP、eWLP、ePLP 等技术。

本书适合从事电子、光电子、MEMS 等器件三维集成研究的工程师、技术研发人员、技术管理人员和科研人员阅读,也可以作为相关专业高年级本科生和研究生的教材。

This Chinese translation is published with the permission of the author and copyright owner of its original book.

图书在版编目(CIP)数据

集成电路三维系统集成与封装工艺=3D IC Integration and Packaging:中文导读:汉、英/(美)刘汉诚(John H. Lau)著;曹立强,刘丰满,王启东导读. —北京:科学出版社,2017.3
(信息科学技术学术著作丛书)

ISBN 978-7-03-052272-6

I. 集… II. ①刘… ②曹… ③刘… ④王… III. 集成电路-封装工艺-汉、英 IV. TN405

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 053122 号

责任编辑:魏英杰 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:张 伟 / 封面设计:陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京九州迅驰传媒文化有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 3 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2017 年 3 月第一次印刷 印张:31 1/2

字数:578 000

定价:198.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

作者简介

John H. Lau(刘汉诚)博士,在半导体领域从业超过 30 年,他曾先后作为资深科学家在美国的惠普公司、安捷伦公司工作超过 25 年;作为微系统、模组与元器件(MMC)实验室主任在新加坡微电子研究所(IME)工作 2 年;作为访问教授在香港科技大学工作 1 年;2010 年 1 月当选台湾工业技术研究院院士,并在台湾工业技术研究院工作数年;2014 年 7 月作为高级顾问就职于 ASM 太平洋公司。

刘博士是电子器件、光电子器件、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 PCB 板等的设计、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,尤其专注于钎焊机理、制造、表面贴装技术(SMT)、扇入和扇出晶圆级倒装芯片封装技术、硅通孔(TSV)技术、三维集成电路(IC)集成技术,以及系统级封装(SiP)技术。

在超过 37 年的研究、研发与制造业经历中,刘博士独自或与他人合作共同发表了 400 多篇技术论文,申请和授权专利 30 多项,并在世界范围内做了 290 多场学术报告。独自或与他人合作编写和出版了 18 部关于 TSV、三维 MEMS 封装、二维/三维 IC 集成可靠性、晶圆级倒装芯片封装(FC-WLP)、BGA 封装、高密度 PCB、SMT、芯片直接贴装、无铅焊料、钎焊与焊料可靠性等方面的教材。

刘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),在威斯康星大学麦迪逊分校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。

刘博士获得 ASME、IEEE、SME 等协会颁发的多个奖项,包括 IEEE/ECTC 最佳论文(1989),IEEE/EPTC 杰出论文(2009),最佳 ASME 会刊论文(Journal of Electronic Packaging, 2000),最佳 IEEE 会刊论文(IEEE CPMT, 2010),ASME/EEP 杰出技术成就奖(1998),IEEE/CPMT 制造奖(1994),IEEE/CPMT 杰出贡献奖(2000),IEEE/CPMT 持续技术杰出贡献奖(2010),中小企业卓越电子制造奖(2001),Pan Wen Yuan 杰出研究奖(2011)、IEEE 继续教育功勋奖(2000),IEEE 元件、封装和制造技术领域奖(2013),以及 ASME Worcester Reed Warner 奖章(2015)。刘博士 1994 年当选为 IEEE Fellow,1999 年当选 ASME Fellow,一直积极参与 ASME 和 IEEE 举办的技术活动。

前 言

3D IC集成正在半导体行业引起风暴,已经在如下方面产生巨大影响:(1)影响芯片供应商(fabless),代工厂,整合元件制造商,外包半导体组装,测试、基板、电子器件制造服务,原始设计制造商,原始设备制造商,材料和设备提供商,大学,以及研究单位;(2)吸引世界各地的研究人员和工程师参加会议、讲座、workshop、小组讨论以及论坛,去展示他们的发现,交换信息,寻求解决方案,学习最新的技术并规划未来;(3)推动行业为3D IC集成建立标准、基础设施和生态系统。

这是个完美的风暴!很多人和公司认为摩尔定律将很快谢幕,而3D IC集成将成为下一个热点。为准备未来并拥有竞争力,他们在3D IC集成方面投入了很大的人力和物力。3D IC集成被定义为采用硅通孔和微凸点在三维方向实现芯片/转接板堆叠,可以实现高性能和高密度,具有低功耗、大带宽、小外形,以及轻型化的封装。因此,硅通孔、超薄晶圆/芯片拿持、微凸点、组装和热管理都是实现3D IC集成最重要的技术。

遗憾的是,对于大多数实际操作的工程师和管理者,以及科学家和研究人员,硅通孔、超薄晶圆的强度测量和拿持、微凸点、再布线层、转接板、芯片-晶圆键合、晶圆-晶圆键合、组装、热管理、可靠性、LED二极管的3D IC集成、微机电系统,以及CMOS图像传感器(CIS)并不好理解。因此,在行业和研究单位内急需有一本全面的书籍来介绍这些重要技术的现况。本书可以帮助读者在进行系统级决策的时候快速了解解决问题的基本方法和利弊。

本书有10个主题:(1)半导体IC封装的3D集成(第1章);(2)TSV电子、温度、机械模型和测试(第2章);(3)用于薄晶圆拿持和压力测量的压力传感器(第3章);(4)封装基板技术(第4章);(5)晶圆凸点、安装和可靠性(第5章);(6)三维硅集成、2.5D/3D IC集成,以及使用无源转接板的3D IC集成(第6~8章);(7)2.5D/3D集成热管理技术(第9章);(8)嵌入式3D集成(第10章);(9)LEDs、MEMS,以及CMOS图像传感器3D集成(第11~13章);(10)3D IC封装(第14章)。

第1章简要讨论3D IC封装,3D IC集成和3D Si集成,介绍TSV技术的供应链,以及CIS和MEMS产品中TSV大规模生产的情况。

第2章介绍TSV高频电学模型和公式,这些公式已经在频率和时间域上得到验证,并且提到单个TSV等效热导率公式。这些公式已经被3D模拟的TSV结

构所验证。最后讨论 Cu pumping, 以及铜填充的 TSV 的禁入区域 keep-out-zone (KOZ)。

第 3 章详细介绍压阻压力传感器的设计、制造和校准。探讨压力传感器在薄晶圆拿持上的应用, 并介绍压力传感器在晶圆凸点上的应用。最后, 介绍压力传感器在嵌入式超薄芯片跌落试验中的应用。

第 4 章介绍针对 2.5D/3D IC 倒装集成应用的 build up 封装基板技术, 也将介绍无芯封装基板。最后, 介绍 build-up 封装基板技术的最新进展。

第 5 章讨论晶圆凸点、组装, 以及 $25\mu\text{m}$ 、 $20\mu\text{m}$ 和 $15\mu\text{m}$ 凸点间距 3D IC 集成的可靠性。对于每个案例, 介绍测试结构、焊接材料、UBM、组装条件、填充和可靠性评估。

接下来的三章内容专门介绍 3D Si 集成、2.5D/3D IC 集成和无源转接板的 3D IC 集成。第 6 章包括 3D Si 集成的概述、展望和挑战。第 7 章讨论 3D IC 集成的潜在应用, 如存储器的堆叠、wide I/O 存储器或者逻辑-逻辑堆叠、wide I/O 动态随机存储器 (DRAM) 或者混合存储立方 (HMC)、wide I/O 2 与高带宽存储器, 以及 wide I/O 接口 (2.5D IC 集成), 并详细介绍 TSV 和 RDL 的制造。最后, 讨论各种薄晶圆拿持方法。第 8 章介绍三种不同基于无源转接板的 3D IC 集成结构。对于每种结构, 都介绍转接板、RDL 制造, 以及芯片在转接板两面的安装。

第 9 章介绍 2.5D/3D IC 集成的温度管理, 提出一种新的设计, 此设计由顶部带有芯片/均温板, 以及底部芯片带有/没有热沉的转接板构成, 并且比较 2.5D 和 3D IC 集成的温度性能。最后, 介绍一种嵌入微流道的 TSV 转接板组成的温度管理体系。

第 10 章介绍嵌入式 3D 混合集成。回顾集成光波导的印制电路板与嵌入式板级光互连技术, 并提出嵌入式三维混合集成系统。最后, 介绍带有应力释放缺口的半嵌入 TSV 转接板。

接下来的三章内容专门介绍 LED、MEMS、CIS 3D IC 集成。第 11 章介绍 Haitz 定律的现状和展望, 以及 LED 产品的四个主要方面, 并介绍 2.5D/3D IC 和 LED 集成。最后, 介绍 3D IC 和 LED 集成的温度管理。第 12 章介绍 3D IC 和 MEMS 集成的 10 种不同的设计和组装工艺, 以及 3D MEMS 封装低温键合工艺。最后, 介绍先进的 2.5D/3D IC 和 MEMS 集成的最新进展。第 13 章介绍前照射 CIS 和背照式 CIS 的区别。讨论两个 3D CIS 和 IC 集成的例子 (一个例子是芯片-晶圆键合技术, 另一个例子是晶圆-晶圆键合技术)。

第 14 章介绍 3D IC 封装, 包括使用引线互连的芯片堆叠、PoP 封装、扇入式晶圆级封装、嵌入式扇出晶圆级封装, 以及嵌入式 (刚性和柔性) 板级封装。

本书的读者会是什么人呢? 毫无疑问, 大部分是以下三种: (1) 从事或准备从

事 3D IC 集成的关键技术,如 TSV、转接板、再分布层、晶圆拿持、微凸点、组装,以及热管理的研究和开发的专业人士;(2)已经遇到实际的 3D IC 集成问题,并希望了解和掌握更多的解决方法的专业人士;(3)要为产品选择一种可靠的、创新的、高性能的、高密度的、低能耗的、高带宽的、高性价比的 3D IC 集成技术的专业人士。本书也可以用作有志于在电子和光电行业成为未来领导者、科学家和工程师的大学学生和研究生的一本。

希望本书可以为所有由于 3D IC 集成和 LEDs、MEMS、CIS 3D IC 集成不断增长的热度而面临各种挑战的人士提供有价值的参考。也希望本书可以推动关键使能技术和更多优秀 3D IC 集成产品应用的研究和发展。

组织机构学会设计和制造 TSV、RDL 和凸点互连,以及 3D IC 集成和封装系统的温度管理,将有可能在电子和光电行业获得领先,在性能、功能、密度、功率、带宽、质量、体积和重量方面有重大收获。希望本书可以从帮助扫除障碍,避免不必要的错误开始,加快 3D IC 集成和封装的使能技术的设计、材料、工艺和生产的发展。

John H. Lau

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 MPS 的 Asheesh Ratra 和 McGraw-Hill 的 Lynn Messina,感谢他们坚定的支持和鼓励。特别感谢 Michael McCabe 和 Steve Chapman, 他们帮我实现了出版本书的梦想。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提供帮助的每一个人。尽管如此,我的内心仍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,台湾工业技术研究院(ITRI)、香港科技大学(HKUST)、新加坡微电子研究所(IME)、安捷伦公司,以及惠普公司。它们为我提供了优秀的、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。感谢惠普公司的 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,以及工业技术研究院的 Ian Yi-Jen Chan,感谢他们的好意和友谊。感谢 ASM 太平洋公司的总经理 Lee Wai Kwong,感谢他对我信任、尊重,以及对我在 ASM 太平洋公司工作的支持。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 J. F. Hung, P. Chen, S. Wu, S. Hung, S. Lai, M. Li, S. Sheu, Z. Lin, C. Lin, W. Lo, M. Kao, H. C. Chien, Y. Chao, R. Tain, M. Dai, S. T. Wu, X. Zhang, C. Selvanayagam, P. Tzeng, C. Chen, S. Chen, C. Wu, C. Lee, C. Zhan, J. Chen, Y. Hsu, T. Ku, A. Kumar, Q. Zhang, M. Jong, G. Huang, V. Lee, V. Kripesh, Y. Y. Ong, S. W. Ho, C. H. Khong, A. Yu, W. Hnin, W. Lee, M.

Jong, V. Sekhar, D. Pinjala, C. Chan, C. Chao, C. Chiu, C. Huang, C. K. Lee, Y. Huang, H. Fu, J. Huang, Z. Hsiao, S. Huang, C. Fan, Y. Lin, K. Kao, C. Ko, T. Chen, T. Chang, R. Cheng, J. Chang, M. Li, M. Ji, J. Cline, K. Saito, Y. Hsin, P. Chang, Y. Chang, H. Chang, C. Lin, R. Lee, M. Yuen, J. Wu, C. Lo, H. Fan, H. Chen, L. Li, P. Su, J. Xue, M. Brillhart, G. Y. Tang, S. Tan, N. Khan, T. G. Lim, B. Lee, T. Shioda, H. Kuruveetil, J. Li, K. Suzuki, K. Fujita, K. Yamada, R. Pamidighantam, P. Ramana, L. Lim, C. Teo, H. Yee, C. Tan, O. Chai, Y. Jie, T. Lim, M. S. Zhang, P. Chan, 以及 C. S. Premachandran。

当然,还要感谢我在 ASM 太平洋公司、台湾工业技术研究院、香港科技大学、新加坡微电子研究所、安捷伦公司、EPS 公司、惠普公司,以及美国圣地亚国家实验室的同事,感谢他们的帮助、坚强支持和富有灵感的讨论。与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。一想到已经结婚并在半导体公司就职的 Judy,以及 Teresa 和我都很健康,我情不自禁地要感谢上帝的慷慨赐福。

导 读

第 1 章

1996 年起,电子产业就已经是最大的产业,到 2015 年末已达到 1.6 万亿美元。有争议的是,电子产业中最重要的发明是 1947 年的晶体管。这使约翰·巴丁、沃尔特·布拉顿和威廉·肖克利获得了 1958 年的诺贝尔物理学奖。1958 年,杰克·基尔比发明了集成电路(IC),这使他获得了 2000 年的诺贝尔物理学奖。6 个月后,罗伯特·诺伊斯也独立发明了集成电路,他没有与杰克·基尔比分享诺贝尔物理学奖,因为他在 1990 年去世了。集成电路的发明唤起了 IC 集成的时代。

1965 年,戈登·摩尔提出 IC 芯片上的晶体管数量(在最小的费用和创新的情况下)每 24 个月翻一倍(这也被叫做摩尔定律)。在过去 50 年,摩尔定律已经成为微电子产业发展最强有力的驱动。也许从片上系统(SoC)来看,摩尔定律强调了在单个芯片上的光刻比例和所有功能的集成(在 2D 平面上)。另一方面,所有这些功能的集成可以通过 3D 集成获得,这正是这本书的中心内容。

第 2 章

硅通孔(TSV)是 3D IC 和硅集成的核心。这一章提出并讨论了 TSV 的电学、热学、力学建模和测试。

第 3 章

在半导体器件的制造、封装、测试过程中,应力的产生是一个不可避免的现象。了解这些应力数据对工艺选择、器件可靠性、制造产量是重要的。压阻式应力传感器是已知的用来测量半导体器件封装中应力的潜在器件。Edwards 等用一个 n 型压阻式应力传感器来定性地估量塑料封装中的应力状态。对于应力的定量测试,已经开发出各种校准方法来确定压阻系数。

校准过的压阻硅应力传感器已经广泛应用于估量几个封装步骤(如晶粒黏合、底部填充、封装)之后硅芯片的表面应力。已有报道显示,在经历了不同的封装步骤之后,硅芯片和其他封装材料(如环氧树脂材料和基板或电路板)之间较大的热膨胀系数(CTE)失配,使硅芯片表面产生残余应力,其范围为 100~200MPa。本

章设计、制造,并且校准了用于实验目的的压阻式应力传感器。在晶圆磨薄工艺过程中,可以用它来测得详细的应力。压阻式应力传感器还被用来估量晶圆级封装工艺过程(如凸点下金属层(UBM)的制造、干膜过程、锡铅凸块)后元件晶圆的应力。最后,压阻式应力传感器将被用来确定跌落冲击测试过程中一个嵌入式超薄芯片的应力。这里简要描述晶圆上应力传感器的设计和制造。

第 4 章

对于 3D 芯片集成来说,无论是对于逻辑区内的存储存储器、SoC 上的存储器、逻辑区内的逻辑区,或者对于支持接插器的芯片,封装基板都是必须的。为什么呢?因为如果三维系统集成模组被直接安装在 PCB 上,由于硅芯片或者硅插入器和 PCB 的 FR4 的热膨胀系数失配,焊点承受了非常大的应力和疲劳,为了增强焊点的可靠性,常常需要底部填充剂。然而,即使使用可返工的底部填充剂,重新加工成的 PCB 的质量也会下降。因此,底部填充剂常常被应用在芯片(或者插入器)和封装基板之间,而不是封装基板和 PCB 之间。在这个案例中,当三维系统集成模组损坏时,回流封装基板和 PCB 之间的焊点,之后移除整个三维系统集成模组和基板。另外,封装基板对于芯片或者插入器上电路的散出有很大的帮助,否则需要高密度以及昂贵的 PCB。

本章中,由于有机封装基板比陶瓷基板更便宜,因此仅考虑了其在三维系统集成中的倒装芯片的累积层的应用。由于在手机和可穿戴产品中的低调需求,无核心封装基板也被呈现在本章。最后是有关有机封装基板在堆叠工艺中的最新进展。

第 5 章

如前所述,3D IC 集成定义为在三维中通过 TSV 和焊料微凸实现堆叠 IC 芯片来实现高性能、低功耗、宽的存储带宽和小型化,可以说与摩尔定律无关。焊料微凸块是 3D IC 集成中的重要技术。倒装芯片所用的普通焊料凸点($100\mu\text{m}$)对于 3D IC 集成来说太大了,因此要求更小的凸点($\leq 25\mu\text{m}$),这种很小的焊料凸点被称为微凸点。

大多数微凸块包括一个铜支柱有或者没有焊帽(solder cap)。电镀铜柱和锡或 SnAg 焊帽是一个相对简单的步骤,已被广泛用于低成本的倒装芯片互连。在这一章中,将介绍制备锡(或 SnAg)封端的铜支柱(有/无 Ni 阻挡)、微凸点和利用镍金属化凸点下面的焊盘。TCB(热压键合)的微凸的装配也将介绍到。最后,讨论一些很可靠的关于微焊连接的数据,首先介绍的是 $25\mu\text{m}$ 间距的微凸块,接着是

20 μm 间距,以及最后的 15 μm 间距。

第 6 章

正如前面所提到的,3D 集成包括 3D IC 封装、3D IC 集成和 3D SI 集成。这三者之间是不同的。由于 3D IC/Si 集成中都使用 TSV,而 3D IC 封装不使用,因此可以通过是否使用 TSV 这一先决条件,将 3D 集成分成两部分,分别为 3D IC 封装和 3D IC/SI 集成。在这一章,将会介绍 3D 集成的起源、发展、挑战,以及 3D SI 集成的展望。在这里会对电子工业做一个简明的介绍。

3D IC 集成的内容将会在后面两章进行介绍,3D IC 封装的内容将在第 14 章进行介绍。第 9~13 章将分别讨论 3D IC 集成系统的热管理、3D 嵌入式混合集成、3D LED 和 IC 集成、3D MEMS 和 IC 集成、3D COMS 图像传感器和 IC 集成。一些关键支持技术,如 TSV、薄晶元的强化与拿持,封装结构、微焊球、装配,以及可靠性已经在第 2~5 章进行了讨论。

第 7 章

与 3D Si 集成不同,3D IC 集成被定义为 IC 薄芯片 TSVs 和通过微铜柱在第三维度的堆叠来实现高性能、高密度、低功耗、宽带宽、小形状因子,以及质量轻的目的。对于 3D IC 集成而言,微铜柱在集成结构中被广泛使用。

不同于 35 年前,对于今天而言,由于相比于 3D SI 集成,3D IC 集成更容易实现,因此大多数人支持 3D IC 集成。尽管 3D SI 集成是完成,甚至超越摩尔定律的最合适的方式。工业界应该坚持去发展技术(6.6 节)、EDA 工具(6.7),以及装配流程。

如图 7.1 所示,有两种不同种类的转接板。其中一种转接板带有有源器件,如晶体管、TSVs、RDLs 等。这种转接板被称为有源转接板,例如 SOC/LOGIC(具有 TSV)以支持/控制宽 I/O 存储器和宽 I/O DRAM(动态随机存取存储器)。另一种转接板具有 TSV 孔、RDL 线路层但不具有有源器件,称为无源转接板(也被称为 2.5D IC 集成)。例如,一块带有 TSVs 和 RDLs 的无功能晶元来支撑芯片(无 TSVs)。两种转接板都可以通过集成无源器件来增加他们的电学性能。这一章主要讨论 3D IC 集成和 2.5D IC 集成。

第 8 章

用转接板实现 2.5D IC 集成已在第 7 章进行了讨论。利用转接板实现的 3D

IC 集成将是本章的重点。主要包括:转接板技术实现了两边芯片的垂直互连;转接板技术实现了单芯片与多芯片之间的垂直互连;用于 3D IC 集成的低成本的转接板。利用 TSV/RDL 这种无源转接板的 3D IC 集成技术也会被简要提到。

第 9 章

2.5D/3D 芯片集成的一个关键问题是其热管理。这是因为:(1)3D 电路增加了单位表面积产生的总功率;(2)如果不提供适当和充分的冷却,3D 堆叠中的芯片可能会过热;(3)3D 堆叠之间的空间对于冷却通道来说可能太小(即没有空气流动的间隙);(4)薄芯片可能对芯片上的热点产生极端条件。因此,2.5D/3D 芯片集成的广泛使用迫切需要低成本和高效的热管理解决方案,这也是本章的重点。重点是低成本(裸芯片)和高热性能 2.5D/3D 芯片集成 SiP 的设计。同时,介绍这种新设计的一些特殊情况。此外,本章还讨论 2.5D 集成和 3D 芯片集成之间的热性能。最后,介绍用于 3D 堆叠 TSV 模块的集成液体冷却系统。

第 10 章

本章设计并描述将低成本(裸芯片)和高性能(光、电、热和机械)光电系统埋入到 PCB 或有机层压基板。该系统由埋入式光学聚合物波导、埋入式垂直腔表面发射激光器(VCSEL)、埋入式驱动器芯片、埋入式串行器、埋入式光电二极管检测器、埋入式跨阻放大器(TIA)、埋入式解串器、埋入式散热片和散热器等组成的刚性 PCB(或基板)。

将裸 VCSEL 芯片、驱动器芯片和串行器芯片进行 3D 堆叠,然后贴到 PCB 中的埋入式光学聚合物波导的一端。类似的,将裸光电二极管检测器、TIA 芯片和解串器芯片进行 3D 堆叠,然后贴到 PCB 的另一端。驱动器或串行器的背面和 TIA 或解串器芯片贴到含有或不含有散热器的散热片上。这种新颖的结构设计为具有光学器件的低成本和高性能半导体电路提供了潜在的解决方案,以实现用于芯片到芯片光学互连应用的宽带宽和小尺寸的光电封装。光学、热管理和机械性能通过基于光学理论、热传导理论和机械学理论的仿真证明。

首先讨论一对旧设计(2D 系统),就是使用光波导的 FR4-PCB 上的高频数据链路和埋入式的板级光互连。最后,介绍具有应力释放间隙的半埋入式硅通孔转接板的设计。

第 11 章

这一章讨论三维 LED(发光二极管)和集成电路封装,包括单 LED 或多 LED 及任意有源集成电路芯片的封装,如专用集成电路、LED 驱动器、处理器、存储器、射频传感器,以及功率控制器的三维与 2.5D 转接板方式的封装。同时,展示和讨论这些封装的装配过程。特别的,讨论 2.5D 集成电路与 LED 集成,例如使用采用涂复磷光体印刷法制成腔体的硅转接板并用填铜硅通孔形成互连的 LED 封装;为 LED 封装的带腔体和硅通孔的硅基板;在带腔体及硅通孔的硅基板上的 LED。最后,提出一个为三维集成电路和 LED 集成封装的热管理系统,简要地叙述 Haitz 定律的现状和未来。

第 12 章

MEMS 是利用微加工技术将传感器、动作器及电子元件等机械元件集成在普通的硅衬底上。应用于传统电子集成电路,如 CMOS 电路中的刻蚀、曝光、掺杂及互连等基本技术和工艺流程,可通过选择性地刻蚀掉部分硅片或添加新结构层来制作微机械元件,进而构成 MEMS 器件。然而,MEMS 和 IC 器件存在根本差异,即 MEMS 器件必须保证可移动。MEMS 器件是利用电子元件来控制机械元件的运动。

人们普遍认为物联网是继智能手机后的下一个大事件。物联网时代被称为 M2M(机对机)革命,而 MEMS 作为机械的重要组成部分之一,将在物联网蓬勃发展中扮演重要的角色。例如,MEMS 传感器可以让设备实现收集和数字化现实生活的数据,并在网上共享。物联网为 MEMS 市场带来了新的发展机会。

第 13 章

CMOS(互补金属氧化物半导体)图像传感器的基本功能是将光(光子)转化为电信号(电子)。CIS(接触式图像传感器)在便携、可移动、可穿戴、汽车产品等领域具有巨大的市场,同时也是物联网的关键要素。例如,在智能手机和平板电脑的相机和汽车的视觉系统上使用接触式图像传感器。通常,一个 CIS 包含一个矩阵的微透镜、晶体管、金属线和 PD(光电二极管)。本章提出一种三维 CIS 和 IC 的集成,重点集中在三维 CIS 和 IC 堆叠和 CIS 和 IC 处理器的三维集成。

第 14 章

在第 1 章提到,三维集成包含三维芯片封装、三维芯片集成和三维硅集成。三维芯片/硅使用硅通孔,但是三维芯片封装没有使用。因为 TSV 技术是实现三维芯片/硅集成技术的最重要的关键要素,本书第 1~13 章已经针对 TSV 进行了研究。本章重点研究三维芯片封装,现在它的制造工艺成熟,一些最新的技术提升使得三维芯片/硅集成免于量产。重点集中在一线键合芯片堆叠、POP、fan-in WLP(芯片级封装)、扇出 eWLP(嵌入式晶圆级封装)、ePLP(嵌入式板级封装)。

Preface

3D IC integration is taking the semiconductor industry by storm. It has been (a) impacting chip suppliers, fabless design houses, foundries, integrated device manufacturers, outsourced semiconductor assembly and test, substrates, electronics manufacturing services, original design manufacturers, original equipment manufacturers, material and equipment suppliers, universities, and research institutes; (b) attracting researchers and engineers from all over the world to go to conferences, lectures, workshops, panels, forums, and meetings to present their findings, exchange information, look for solutions, learn the latest technologies, and plan for their future; and (c) pushing the industry to build standards, infrastructures, and ecosystems for 3D IC integration.

This is a perfect storm! People and companies think that Moore's law is going to take a bow soon and 3D IC integration is the next hot spot. In order to prepare for their future and have a competitive edge, they have been investing heavily in both human and physical resources for 3D IC integration. 3D IC integration is defined as stacking up thin chips/interposers in the third dimension with through-silicon vias (TSVs) and microbumps to achieve high performance and density, low power consumption, wide bandwidth, small form factor, and light weight. Thus TSVs, thin-wafer/chip handling, microbumps, assembly, and thermal management are the most important key enabling technologies for 3D IC integration.

Unfortunately, for most practicing engineers and managers, as well as scientists and researchers, TSVs, thin-wafer strength measurement and handling, microsolder bumping, redistribution layers (RDLs), interposers, chip-to-wafer bonding, wafer-to-wafer bonding, assembly, thermal management, reliability, and 3D IC integration with light-emitting diodes (LEDs), microelectromechanical systems (MEMS), and complementary metal-oxide semiconductor (CMOS) image sensors (CIS) are not well understood. Thus, there is an urgent need, in both industry and research institutes, to create a comprehensive book on the current state of knowledge of these key enabling technologies. This book is written so that readers can quickly learn about the basics of problem-solving methods and understand the tradeoffs inherent in making system-level decisions.

There are 10 major subjects in this book, namely, (1) 3D integration for semiconductor IC packaging (Chap. 1); (2) TSV electrical, thermal, and mechanical modeling and testing (Chap. 2); (3) stress sensors for thin-wafer handling and strength measurement (Chap. 3); (4) package substrate technologies (Chap. 4); (5) microsolder wafer bumping, assembly, and reliability (Chap. 5); (6) 3D Si integration, 2.5D/3D IC integration, and 3D IC integration with passive interposer (Chaps. 6, 7, and 8); (7) thermal management of 2.5D/3D IC integration (Chap. 9); (8) embedded 3D hybrid integration (Chap. 10); (9) 3D IC integration with LEDs, MEMS, and CIS (Chaps. 11, 12, and 13); and (10) 3D IC packaging (Chap. 14).

Chapter 1 briefly discusses 3D IC packaging, 3D IC integration, and 3D Si integration. The supply chains before and for the TSV eras are provided. The status of TSV high-volume manufacturing for CIS and MEMS products is presented.

Chapter 2 presents a high-frequency electrical analytic model and equations for a generic TSV structure. These equations have been verified in the frequency and time domains. Also, the equivalent thermal conductivity equations for a generic TSV are provided. These equations have been verified by 3D simulations of the TSV structure. Finally, Cu pumping and the keep-out-zone of Cu-filled TSVs are discussed.

Chapter 3 details the design, fabrication, and calibration of piezoresistive stress sensors. The application of stress sensors to thin-wafer handling is explored. Also, the application of stress sensors in wafer bumping is shown. Finally, the application of stress sensors in drop tests of embedded ultrathin chips is presented.

Chapter 4 presents the package substrates with build-up layers for flip chip 2.5D/3D IC integration applications. The coreless package substrate is also provided. Finally, the recent advances of package substrates with build-up layers are examined.

Chapter 5 discusses the wafer bumping, assembly, and reliability of 3D IC integration solder bumps at 25- μm , 20- μm , and 15- μm pitches. For each case, the test structure, solder material, under bump metallurgy (UBM), assembly condition, underfill, and reliability assessment are examined.

The next three chapters are specifically for 3D Si integration, 2.5D/3D IC integration, and 3D IC integration with passive interposer. Chapter 6 presents the overview, outlook, and challenges of 3D Si integration. Chapter 7 discusses the potential application of 3D IC integration, such as memory-chip stacking, wide I/O memory or logic-on-logic, wide I/O dynamic random-access memory (DRAM) or hybrid memory cube (HMC), wide I/O 2 and high bandwidth memory (HBM), and wide I/O interface (2.5D IC integration). Also, the fabrication of TSVs and RDLs are detailed. Finally, various thin-wafer handling methods are discussed. Chapter 8 presents three different structures of 3D IC integration with passive interposer. For each structure, the fabrication of the interposer and RDLs and final assembly of chips on both sides of the interposer are provided.

Chapter 9 presents the thermal management of 2.5D/3D IC integration. A new design which consists of an interposer with chips/heat spreader on its top side and chips with or without heat slugs on its bottom side is proposed. Also, a thermal performance comparison between 2.5D and 3D IC integration is provided. Finally, a thermal management system consisting of TSV interposers with embedded microchannels is presented.

Chapter 10 presents embedded 3D hybrid integration. Printed circuit boards using optical waveguides and embedded board-level optical interconnects are examined. Also, an embedded 3D hybrid integration system is proposed. Finally, a semi-embedded TSV interposer with a stress relief gap is presented.

The next three chapters are specifically for 3D IC integration with LEDs, MEMS, and CIS. Chapter 11 presents the status and outlook of Haitz's law and four key segments of LED products. Also, the 2.5D/3D IC and LED integrations are presented. Finally, the thermal management of 3D IC and LED integration is presented. Chapter 12 presents 10 different designs and assembly processes of 3D IC and MEMS integration. Also, a low-temperature bonding of 3D MEMS packaging with solders is provided. Finally, recent developments in advanced 2.5D/3D IC and MEMS integration are examined. Chapter 13 presents the difference between front-illuminated (FI) CIS and back-illuminated (BI) CIS. Two examples (one is chip-to-wafer bonding and the other is wafer-to-wafer bonding) of 3D CIS and IC integration are discussed.