



装备科技译著出版基金

晶圆键合手册

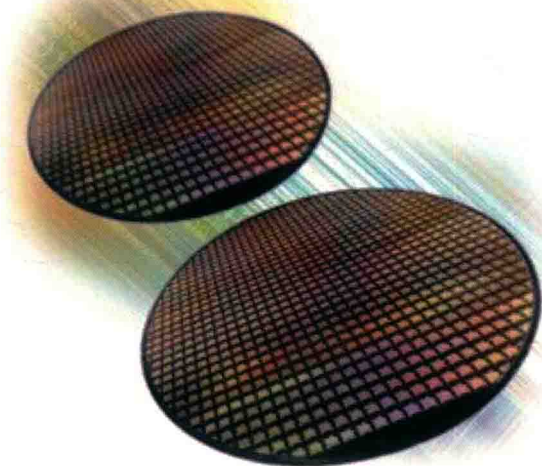
Handbook of Wafer Bonding

[德] Peter Ramm [美] James Jian-Qiang Lu

[挪威] Maaik M.V. Taklo

编

安兵 杨兵 译



国防工业出版社

National Defense Industry Press

WILEY



装备科技译著出版基金

晶圆键合手册

Handbook of Wafer Bonding

[德] Peter Ramm [美] James Jian-Qiang Lu
[挪威] Maaiké M. V. Taklo 编

安兵 杨兵 译



国防工业出版社

·北京·

著作权合同登记 图字：军—2012—171 号

图书在版编目 (CIP) 数据

晶圆键合手册 / (德) 彼得·拉姆 (Peter Ramm), (美) 詹姆斯·卢建强 (James Jian-Qiang Lu), (挪) 马艾克·M.V.塔克鲁 (Maaikje M. V. Taklo) 编; 安兵, 杨兵译. —北京: 国防工业出版社, 2016.11

书名原文: Handbook of Wafer Bonding

ISBN 978-7-118-10317-5

I. ①晶… II. ①彼… ②詹… ③马… ④杨… ⑤安… III. ①键合工艺—手册 IV. ①TN405-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 295923 号

Handbook of Wafer Bonding by Peter Ramm, James Jian-Qiang Lu, and Maaikje M.V. Taklo
ISBN 978-3-527-32646-4

©2012 Wiley-VCH Verlag & Co. KGaA, Boschstr. 12, 69469 Weinheim, Germany

All rights reserved. Authorised translation from the English language edition published by John Wiley & Sons Limited. Responsibility for the accuracy of the translation rests solely with National Defense Industry Press and is not the responsibility of John Wiley & Sons Limited. No part of this book maybe reproduced in any form without the written permission of the original Copyrights holder.

Copies of this book sold without a Wiley sticker on the cover are unauthorized and illegal.

本书简体中文版由 John Wiley & Sons, Inc. 授权国防工业出版社独家出版。
版权所有, 侵权必究。

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 18½ 字数 410 千字

2016 年 11 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—1500 册 定价 89.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 88540777

发行邮购: (010) 88540776

发行传真: (010) 88540755

发行业务: (010) 88540717

前 言

有人可能会问是否还需要一本有关晶圆键合的书。答案是肯定的。在过去的几年中，在新的技术领域随着各种材料广泛应用于晶圆键合，晶圆键合的研究和开发呈现加速地发展。我们非常需要对近年来晶圆键合的基本原理、材料、技术和应用以手册的形式进行总结，而不是仅仅关注科学的基本原理和应用。

到目前为止，已经有一些有关晶圆键合的书籍和概述文章，如：

- Tong Q-Y and Gosele U (1999). *Semiconductor Wafer Bonding: Science and Technology*, John Wiley & Sons, Inc.;
- Alexe M and Gosele U (eds) (2004). *Wafer Bonding: Applications and Technology*, Springer;
- PloSl A and Krauter G (1999). Wafer direct bonding: tailoring adhesion between brittle materials. *Materials Science and Engineering*, R25, 1-88.

但我们还需要对其进行不断更新。这个更新主要是由于具有新功能层的三维（3D）集成、临时键合和微机电系统（MEMS）的研究和开发步伐的加快。

以前，晶圆键合用于绝缘层上的硅晶圆的制造，构造传感器和执行器，以及不同的流体系统中。现在，IC晶圆的制造企业也知晓与晶圆键合技术相关的术语。由于摩尔定律似乎走到了尽头，因此至少满足在三维空间的一些电阻、存储器和逻辑器件的堆叠来提高晶体管的密度进而提高器件的性能和功能。IC制造企业致力于生产大量的更大尺寸的晶圆，这对晶圆键合设备的供应商提出了挑战。对于晶圆堆叠的关注导致了对准精度的提高、大尺寸晶圆设备、更加关注新材料、更低的成本和高产出率等情况的发生。

基于这些年在晶圆键合方面的巨大进步，编者邀请了各国专家来参与编写这部晶圆键合手册的各个章节，其中包含了众多的技术和应用。晶圆键合技术在第一部分对这些技术进行介绍，把它们分为：（1）黏结和阳极键合；（2）直接晶圆键合；（3）金属键合和（4）混合金属/电介质键合。几次其他技术分类方法也是合理的，但这里的分类方法是基于材料、键合方法和它们可能的应用。在第二部分中，对一些晶圆键合的关键应用，例如3D集成、MEMS和临时键合进行了总结，以此来向读者展示晶圆键合技术的重要应用。

本手册关注包括芯片到晶圆键合在内的晶圆级键合技术。然而，其中的一些技术在进行适当调整后也适用于芯片到芯片的键合。

Peter Ramm
James Jian-Qiang Lu
Maaiké M.V Taklo

绪 论

作为本书的编辑，我们认为对于晶圆键合技术的更新有强烈的需要^[1-3]。主要原因是由于近几年来其加速发展促使了晶圆键合在新技术领域的推广使用，如具有新功能层的三维（3D）集成、临时键合和微机电系统（MEMS）。随着新应用领域的变化，晶圆键合技术出现新的目标。与 MEMS 应用相比，传统 IC 制造采用的更细间距，要求复杂的晶圆键合解决方案。金属，如铜，已广泛应用于 IC 领域，在晶圆键合方面也得到了很多的关注。对于在 IC 晶圆中包含通过硅过孔（TSV）的真正的三维垂直集成，在晶圆的界面之间需要电学互连并通过金属键合实现。界面互连以及 TSV 可以在键合之前或之后形成。本手册涵盖了各种晶圆键合的技术和应用，内容结构上也是针对这两方面进行阐述的。

1. 技术

在第一部分（A）中，技术分为 4 类：

- A) 黏合剂和阳极键合；
- B) 直接晶圆键合；
- C) 金属键合；
- D) 混合金属/介质键合。

使用其他方法对该技术进行分类也是可以的，但这里的分类主要区分材料、方法以及应用。我们从研究和商业领域角度出发，试图包括所有受关注的键合技术，但忽略了一些技术的变化。这些都不能被遗忘或被排除，但一定程度的标准化是有益于大多数领域的。

也就是说，进一步优化现有的键合技术还是转移到一种新的键合方法，是一个艰难的决定。从一项键合技术转移到另一项可能需要几年，一些公司经历过痛苦的教训。以 MEMS 为例：MEMS 制造商似乎正逐步从基于玻璃的方法转移到基于金属的方法。一个产品可以得益于金属键合情况下减小的键合框架宽度，但包含金属的键合框架材料对于产品的整个工艺流程可能会造成影响。但在同一制造商投资的其他产品中，前者的基于玻璃的解决方案可能是一个更好的解决方案。结果是制造商必须采用两项键合技术而不是只有一项，这通常会增加制造成本，因为保持两个工艺的持续运行在工程上需要更多的努力。必须作出一些抉择：对一个给定的产品，键合技术是否要始终保持改变或升级；或采用一个鲁棒性的和灵活的键合技术并相应地修改所有的产品。在本手册中，读者会发现截至目前最常用的键合解决方案的概述，以及对这些选择的讨论。

在第一部分中（A），我们考虑了黏合剂、阳极、玻璃料和旋涂玻璃（SOG）键合。玻璃材料通常用于阳极、玻璃料和 SOG 键合。通常，键合材料用于黏合剂、玻璃和 SOG 键合的旋涂和覆盖。第一部分（A）主要关注这些材料。

黏合剂键合在某些情况下被称为“简单”的黏合晶圆。这似乎没有其他键合方法先

进。然而，这是不正确的，读者可以从第 3 章获得一个清晰的认识。即使最后优化的黏合剂键合工艺看起来很明显，这是由于表面形貌可以在很大程度上得到补偿并且键合材料看起来是均匀的，但也不应该这样被表象蒙蔽。一个成功的黏合剂键合是结合先进材料的开发和仔细的键合工艺优化得到的一个典型结果。黏合剂键合的应用范围覆盖从键合灵敏的逻辑晶圆到流体系统中大线宽、低成本晶圆键合。此外，临时键合在很大程度上基于对黏合剂键合的了解。然而，一些新材料已经开发用于临时键合，特别是需要引入剥离时。对于剥离（粗糙度可以调整到纳米精度），一些替代的工艺改进技术在几年前由 SOITEC/LETI 提出，但目前在该领域似乎占主导地位。

阳极键合历史悠久，通常认为是从 Wallis 和 Pomerantz (1969) 的文章开始的。该工艺的鲁棒性可能是该技术一直使用的原因。它是一个流行的、特别适用于 MEMS 制造的键合技术，而该技术在本书第 4 章进行阐述，本章的作者在阳极键合的工业应用方面有几十年的丰富经验。这项键合技术需要考虑表面形貌方面的要求，要达到大多数 MEMS 制造商可接受的水平。尽管要求低的表面粗糙度，但水平导体的智能设计已经允许采用阳极键合来密封腔体。

腔体随交叉导体线按比例缩小的挑战已一再出现。在第 1 章描述的玻璃键合，提供了一个针对该方法的方法，因为可以容忍更大的表面粗糙度。由于在这两种情况下的最终键合是玻璃，因此对两种竞争性的技术，在可靠性方面面临几个共同的问题（泄漏率、断裂力学等）。然而，今天我们看到几个玻璃晶圆制造商提供有硅或金属垂直过孔的晶圆。当导体不再与键合线交叉时，阳极键合有可能会获得一些新的关注。旋涂玻璃不像其他已提及的技术一样广泛使用，但是这种技术有一些优点，有必要在单独一章进行介绍（第 2 章）。

第一部分 (B) 收集了直接晶圆键合 (DWB) 方法。此方法局限于晶圆为裸片或氧化后直接接触的技术。我们认为熔融键合和离子体活化键合 (PAB) 是 DWB 的子集，而相关话题将分别在第 5 章和第 6 章进行深入的描述。在这两种情况下，晶圆在室温下预键合，而键合后退火是根据所需的温度在一个炉子或热腔体中进行。晶圆的预处理在这两种情况中是不同的，但通常表面通过浸润或干法处理后呈现极端的亲水性或疏水性。键合后处理温度范围从 PAB 的低温（或不加热）到熔融键合的加热到 1000°C 以上。显然，温度处理对工艺顺序如何组织设置了限制条件，而且对于考虑了表面粗糙度的 DWB 的极端要求对晶圆在键合前如何处理设置了严格的限制条件。这些问题在处理 DWB 的技术和应用的章节中进行讨论。

第一部分 (C) 用 4 章讨论金属的键合方法。在半导体工业中已经证明，有大量金属适用于晶圆级的键合。当作为 CMOS 工业中一部分的金属可以用于键合时，这无疑是有利的，但这并没有成为选择金属的一个绝对限制。当键合作为最后一个工艺步骤进行时，较少关注与现有材料的相容性问题，只要包含一个合适的扩散阻挡层即可。但当键合作为一个中间工艺步骤时，金属的选择是至关重要的。由于兼容性问题等原因，作为键合材料的铜的应用最近变得很流行。对于晶圆键合来说，铜是所需要的一种材料，此时可能需要高键合压力和/或苛刻的表面控制。然而，这些障碍已经（例如第 9 章所述）克服了。其他关注的金属或金属系统是锡、铜、金和钨的组合。关于这些系统的相应相图复杂性的重要知识，在很大程度上，来自电子封装领域的研究人员的研究成果。在第

7、8 和 10 章的图表中，描述了这方面用来“驯服”魔鬼的知识。

第一部分 (D) 中所述的混合键合的想法，基本上是把最好的两个领域结合到晶圆键合的方法中，导致晶圆之间的机械和电学连接在同一步骤中实现。面临的挑战是找到同时适合两种键合方法的工艺参数。对这一挑战，已经提出了多个解决方案，本部分中的几章内容都针对这一主题。第 12 章和第 13 章描述金属（如铜或镍）如何和无机介质（如氧化物）进行结合；铜与聚合物的结合在 11 章中进行介绍。这些讨论的核心部分是如何对两种材料同时调整抛光工艺，实现高质量键合要求的表面光洁度。

2. 应用

在第二部分中，介绍了晶圆键合的新应用。

在一般情况下，晶圆键合技术的应用范围广泛，如：

- 绝缘衬底上的硅晶圆或半导体的其他应用；
- MEMS 非密封的、密封的、极密封连结部分，以及结合的可能性；
- 在热管理或生物医学设备中用于各种应用的流体系统；
- 用于进一步加工的在半导体工艺和封装中处理的薄晶圆/芯片；
- 用于计算和通信系统的堆叠存储器或存储器/处理器的 3D IC；
- 使用 3D 异构集成和封装将各种组件（如 CMOS 图像传感器和读出电路）集成到一个紧凑的系统中。

这部手册的目的不是对晶圆键合的应用给出一个全面的总结，因为有许多应用已在其他书籍中描述，并且更多的应用仍在不断地出现。除了在第一部分中讨论的应用，在第二部分中还总结了最近开发的主要晶圆键合应用，即 3D 集成、MEMS 和临时键合，让读者领略到晶圆键合技术应用的重要意义。

3. 定义

许多术语在本手册的各章节进行了定义。在这里，我们只关注几个应进一步明确术语。

在本手册中有几章内容涉及采用金属系统的晶圆键合。除了直接金属键合（第 6 章和第 9 章），还有两个键合方法采用液相：共晶键合和固-液互扩散 (SLID) 键合（第 7 章和第 10 章）。两者都采用低熔点和熔点金属的结合，但不幸的是，并不总能在文献中正确区分。共晶焊接是一项非常著名的技术，已在微电子封装中使用了许多年，例如所谓的倒装芯片键合。加热到熔化温度并冷却的焊接工艺，在原理上是可逆的：通过再次加热到高于共晶温度，金属系统重新熔化。相比之下，SLID 键合是不可逆的，利用一个高熔点金属固体材料在恒定的温度扩散到一个低温度金属的液相，导致一个热力学稳定的金属间化合物。这可能会有些混淆，在书中有不同的术语用于这个专用焊接原理，例如“瞬时液相键合”。由于在 1966 年，该工艺最初由 Bernstein 和 Bartholomew 进行了描述^[4]，编辑们更喜欢使用原来 SLID 的术语定义。

三维集成通常定义为堆叠的制造和器件层的垂直互连。许多相应的技术概念自 20 世纪 80 年代已经引入（例如，西门子和慕尼黑弗劳恩霍夫研究所），而且几家公司和研究机构已经开发出全 3D 的工艺演示。然而，只有少数用于生产。其中一个原因是担心在生产线上引进精良的先进工艺。可靠和健壮的晶圆键合技术在 3D 集成产品的制造中发挥着关键作用。

在第 15 章中介绍了需要特定键合技术的 3D 集成的不同应用。这里对各种 3D 技术类别进行了定义，特别是对 TSV 技术的关注。TSV 定义为一个硅衬底的两侧之间的电学互联。除了 TSV 工艺，晶圆减薄、薄晶圆处理、背面处理以及 3D 堆叠都是基本的工艺单元。这里，薄晶圆处理和 3D 堆叠需要采用晶圆键合技术：

- 对于 3D 堆叠的永久键合（第 2 章~第 14 章）；
- 对于薄晶圆处理的临时键合（第 16 章、第 18 章和第 19 章）。

晶圆键合技术的选择要考虑全部工艺条件如温度的限制和技术单元的顺序，对于不同的应用可能会有所不同。由此产生的各种工艺流程是根据 ITRS[5]进行分类，并且明确地对应于 TSV 处理、晶圆减薄和晶圆键合的顺序。相对于器件制备，TSV 工艺的顺序是一个主要的标准，现在常用于表征 TSV 的制造：

- 在硅前段制程（FEOL）之前——“先制作过孔”；
- 在硅后段制程（BEOL）之后——“后制作过孔”；
- 在 FEOL 之后但在 BEOL 之前——“中间制作过孔”。

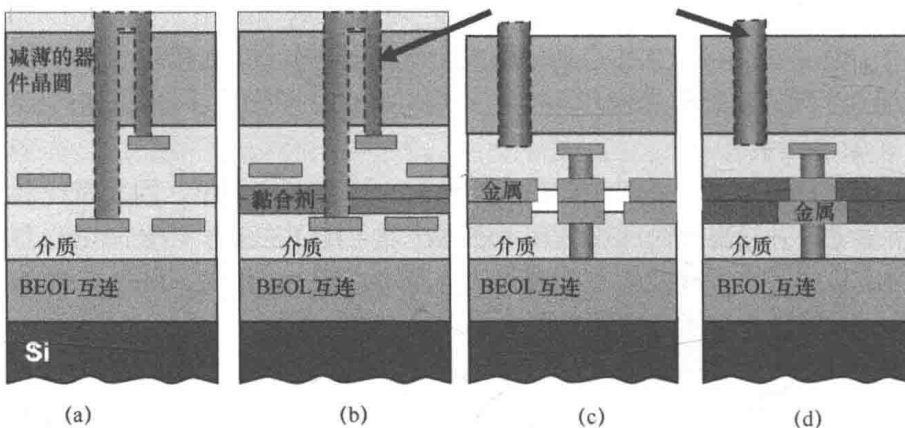


图 1 采用 TSV（不按比例）的 3D 集成的四种典型的晶圆键合方案示意图。减薄的器件晶圆通常包括 FEOL 器件和 BEOL 互连（未显示）

(a) 介质键合；(b) 黏合剂键合；(c) 金属键合；(d) 金属/介质混合键合。

对于 3D 集成的产品制造，相应的 TSV 技术的选择对所采用的晶圆键合技术有显著的影响，如图 1 所示。这里，图 1 (a)、(b) 所示方法是“最后制作过孔”的 3D 集成技术，而 TSV 在晶圆键合和减薄后形成。图 1 (c)、(d) 所示方法可以在键合过程中形成电学互连，而 TSV 可以在工艺流程任何阶段进行加工，这取决于应用和工艺的限制。详细的材料和键合条件在相应章节中进行了描述。

在第 15 章中，对众多的 3D 集成技术进行了定义和分类。对 3D 集成应用中最常见的晶圆键合技术、键合工艺和 3D 工艺流程之间的相互影响进行了详细说明和示范性的描述。

4. 结论

本手册总结了各种不同的晶圆键合技术及其应用，特别是在各个章节强调了晶圆键合所需的基本知识。由于聚合物更广泛地应用于电子和传感器中来降低成本，因此除了需要物理和电子知识外，还需要在一些研究领域占主导地位的化学知识。为了能很好地

理解在加热和冷却过程中不同的相是如何形成的，共晶键合要求透彻地了解冶金学的相关内容。对于黏合剂键合，理解分子交联以及材料的热软化是很重要的。对于上述两个键合解决方案，表面的浸润性是至关重要的，所以这是另一个应该好好理解的话题。对金属/介质混合键合，了解化学、物理以及表面平坦化和处理是至关重要的。当对其进行表征时，它往往是断裂力学考虑的话题。为了确保键合界面的可靠性，了解界面的键合强度如何表征是非常重要的。

对于未来的应用和各种主题，需要更多的知识，如更大或更薄的晶圆和细间距的晶圆间互连（如 TSV），以及更好的对准、更好的晶圆减薄控制以及热机械约束。我们希望看到不同公司对特定产品和应用进行研究和开发的更详细资料。

参 考 文 献

- 1 Tong, Q.-Y. and Gösele, U. (1999) *Semiconductor Wafer Bonding: Science and Technology*, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- 2 Plöchl, A. and Kräuter, G. (1999) Wafer direct bonding: tailoring adhesion between brittle materials. *Mater. Sci. Eng.*, **R25**, 1–88.
- 3 Alexe, M. and Gösele, U. (eds) (2004) *Wafer Bonding: Applications and Technology*, Springer, Berlin.
- 4 Bernstein, L. and Bartholomew, H. (1966) Applications of solid–liquid interdiffusion (SLID) bonding in integrated-circuit fabrication. *Trans. Metall. Soc. AIME*, **236**, 405–412.
- 5 Semiconductor Industry Association (2009) *The International Technology Roadmap for Semiconductors*, SEMATECH, Austin, TX (2010 update).

目 录

第一部分 技术

A. 黏合剂和阳极键合	2
第 1 章 玻璃料晶圆键合	2
1.1 玻璃料键合原理	2
1.2 玻璃料材料	3
1.3 丝网印刷：将玻璃料涂覆到晶圆上的工艺	4
1.4 热处理：将印刷浆料转变为玻璃的键合工艺	5
1.5 晶圆键合工艺：由玻璃料中间层形成基本的晶圆到晶圆黏合	8
1.6 玻璃料键合的特性	10
1.7 玻璃料晶圆键合的应用	12
1.8 结论	12
参考文献	12
第 2 章 利用旋涂玻璃作为键合材料的晶圆键合	13
2.1 旋涂玻璃材料	13
2.2 采用 SOG 层的晶圆键合	14
2.2.1 试验	14
2.2.2 利用硅酸盐 SOG 层的晶圆键合	15
2.2.3 平坦化 SOG 的晶圆键合	19
2.2.4 利用 SOG 层进行晶圆键合的应用	21
2.2.5 结论	21
参考文献	22
第 3 章 聚合物晶圆键合	23
3.1 引言	23
3.2 聚合物黏合剂	23
3.2.1 聚合物黏结机制	23
3.2.2 聚合物黏合剂的性能	25
3.2.3 用于晶圆键合的聚合物黏合剂	26
3.3 聚合物黏合剂晶圆键合技术	30
3.3.1 聚合物黏合剂晶圆键合工艺	30
3.3.2 局部聚合物黏合剂晶圆键合	34
3.4 在聚合物黏合剂晶圆键合中晶圆到晶圆对准	36
3.5 聚合物黏合剂晶圆键合工艺和流程实例	37

3.5.1	用热固性聚合物键合进行永久晶圆键合 (BCB) 或临时晶圆键合 (mr-I9000)	37
3.5.2	采用热塑性聚合物 (HD-3007) 的临时和永久性晶圆键合	39
3.6	总结和结论	40
	参考文献	40
第 4 章	阳极键合	43
4.1	引言	43
4.2	阳极键合机制	43
4.2.1	玻璃极化	43
4.2.2	实现紧密接触	44
4.2.3	界面反应	45
4.3	键合电流	45
4.4	阳极键合所用的玻璃	46
4.5	键合质量的表征	47
4.6	真空密封腔体内的气压	48
4.7	阳极键合对柔性结构的影响	48
4.8	阳极键合过程中器件的电学退化	48
4.8.1	钠污染导致的退化	49
4.8.2	高电场导致的退化	50
4.9	薄膜键合	51
4.10	结论	52
	参考文献	52
B.	直接晶圆键合	56
第 5 章	直接晶圆键合	56
5.1	引言	56
5.2	表面化学与物理	56
5.3	晶圆键合技术	58
5.3.1	亲水性表面晶圆键合	58
5.3.2	疏水性晶圆键合	60
5.3.3	低温晶圆键合	61
5.3.4	超高真空下的晶圆键合	61
5.4	键合的界面特性	62
5.5	晶圆键合的应用	64
5.5.1	先进微电子的衬底	64
5.5.2	微机电系统 (MEMS) 和纳机电系统 (NEMS)	65
5.6	结论	66
	参考文献	66
第 6 章	等离子体活化键合	71
6.1	引言	71

6.2	理论	71
6.2.1	(硅)直接键合	71
6.2.2	硅表面等离子体的机理	72
6.2.3	等离子体的物理定义	73
6.3	PAB 的分类	73
6.3.1	低压 PAB	73
6.3.2	常压下的 PAB	74
6.4	PAB 工序	75
6.4.1	工艺流程	75
6.4.2	技术表征	76
6.4.3	实验结果	77
6.5	PAB 的应用	78
6.5.1	压力传感器	79
6.5.2	光学微系统	79
6.5.3	微流体封装	79
6.5.4	背照式 CMOS 图像传感器	80
6.5.5	低压 PAB 的 CMOS 适用性	81
6.6	结论	81
	参考文献	81
C.	金属键合	84
第 7 章	Au/Sn 焊料	84
7.1	引言	84
7.2	Au/Sn 焊料合金	85
7.3	回流焊	90
7.4	热电极焊接	92
7.5	三维集成和晶圆级组装的特性	95
7.6	总结和结论	97
	参考文献	97
第 8 章	共晶 Au-In 键合	99
8.1	引言	99
8.2	有机/金属混合键合	99
8.3	有机/In-Au 混合键合	101
8.3.1	In-Au 相图和键合原理	101
8.3.2	通过平坦化剥离法制备 In-Au 微凸点	103
8.3.3	共晶 In-Au 键合和环氧树脂黏合剂注入	104
8.3.4	In-Au 微凸点的电学特性	105
8.4	通过共晶 In-Au 键合制造的三维 LSI 测试芯片	106
8.5	高密度与窄间距微凸点技术	108
8.6	结论	112

参考文献	112
第9章 全覆铜和图案化晶圆的 Cu-Cu 热压键合	115
9.1 引言	115
9.2 Cu 键合技术的分类	115
9.2.1 热压 Cu 键合	115
9.2.2 表面活化 Cu 键合	116
9.3 Cu 键合的基本特性	116
9.3.1 Cu 键合层的形态和氧化物检验	116
9.3.2 Cu 键合过程中的微结构演变	117
9.3.3 Cu 键合过程中晶向演变	118
9.4 Cu 键合的发展	118
9.4.1 Cu 键合焊盘的制作和表面清理	118
9.4.2 Cu 键合参数	119
9.4.3 结构设计	119
9.5 Cu 键合质量表征	120
9.5.1 机械测试	121
9.5.2 图像分析	121
9.5.3 电学表征	121
9.5.4 热可靠性	122
9.6 Cu-Cu 键合的对准精度	122
9.7 可靠的 Cu 键合和多层堆叠	122
9.8 未全部覆盖的 Cu-Cu 键合	125
9.9 低温 (< 300°C) Cu-Cu 键合	126
9.10 Cu 晶圆键合的应用	127
9.11 总结	127
参考文献	127
第10章 晶圆级固液互扩散键合	130
10.1 背景	130
10.1.1 固液互扩散键合工艺	130
10.1.2 SLID 键合与焊接的对比	131
10.1.3 SLID 键合的材料系统	132
10.2 Cu-Sn SLID 键合	136
10.2.1 Cu-Sn 材料特性及需要的金属层厚度	136
10.2.2 键合工艺	138
10.2.3 SLID 键合的预处理要求	141
10.2.4 无助焊剂键合	141
10.3 Au-Sn SLID 键合	143
10.3.1 Au-Sn 材料性质和要求的金属层厚度	143

10.3.2	键合工艺	144
10.4	SLID 键合的应用	145
10.4.1	Cu-Sn 键合	145
10.4.2	Au-Sn 键合	148
10.5	SLID 键合完整性	149
10.5.1	电学可靠性和电迁移测试	149
10.5.2	SLID 键合的机械强度	149
10.6	总结	152
	参考文献	152
D.	混合金属/电介质键合	155
第 11 章	混合金属/聚合物晶圆键合平台	155
11.1	引言	155
11.2	使用混合铜/BCB 键合的三维平台	157
11.3	混合 Cu/BCB 键合平台的基准键合工艺	159
11.4	Cu/BCB 混合键合工艺问题的评价	160
11.4.1	部分固化的 BCB 的 CMP 和键合	160
11.4.2	Cu/BCB CMP 表面形貌	161
11.4.3	混合 Cu/BCB 键合界面	162
11.4.4	部分固化 BCB 的形貌适应能力	164
11.4.5	混合 Cu/BCB 键合的电学表征	167
11.5	总结和结论	168
	参考文献	169
第 12 章	Cu/SiO ₂ 混合键合	172
12.1	引言	172
12.2	覆盖 Cu/SiO ₂ 的直接键合原理	173
12.2.1	化学机械抛光参数	173
12.2.2	键合质量和对准	177
12.3	覆盖铜的直接键合原理	178
12.4	电学表征	182
12.5	芯片到晶圆键合	185
12.5.1	菊花链结构	186
12.6	总结	187
	参考文献	187
第 13 章	金属/二氧化硅混合键合	189
13.1	引言	189
13.2	金属/非黏合剂混合键合-金属 DBI [®]	189
13.3	金属/二氧化硅 DBI [®]	190
13.3.1	金属/二氧化硅 DBI [®] 表面制造	190
13.3.2	金属/二氧化硅 DBI [®] 表面图形	191

13.3.3	金属/二氧化硅 DBI [®] 表面形貌	191
13.3.4	金属/二氧化硅 DBI [®] 表面粗糙度	191
13.3.5	金属/二氧化硅 DBI [®] 表面的活化与终止	191
13.3.6	金属/二氧化硅 DBI [®] 对准和混合表面接触	192
13.3.7	与 DBI [®] 表面加工和电学互连相关的金属参数	194
13.3.8	DBI [®] 金属/二氧化硅的技术发展水平	195
13.4	金属/氮化硅 DBI [®]	196
13.5	金属/二氧化硅 DBI [®] 混合键合应用	197
13.5.1	像素化的 3D IC	197
13.5.2	三维异构集成	199
13.5.3	CMOS (超) 低-k 3D 集成	200
13.6	总结	200
	参考文献	201

第二部分 应用

第 14 章	微机电系统	203
14.1	引言	203
14.2	MEMS 封装中的晶圆键合	203
14.2.1	晶圆划片中的保护	203
14.2.2	电学信号线的布线	204
14.3	构造先进 MEMS 结构的晶圆键合	205
14.3.1	几个晶圆的堆叠	205
14.3.2	键合晶圆的后处理	205
14.4	MEMS 案例及键合工艺要求	206
14.5	一些常见晶圆键合工艺的集成	207
14.5.1	图形化晶圆的熔融键合	207
14.5.2	图形化晶圆的阳极键合	209
14.5.3	图形化晶圆的共晶键合: AuSn	211
14.6	总结	214
	参考文献	214
第 15 章	三维集成	217
15.1	定义	217
15.2	3D 集成技术中晶圆键合的应用	218
15.3	转向 3D 集成的动机	219
15.4	三维集成技术的应用	221
15.4.1	演化而非革命的三维集成应用	221
15.4.2	微凸点键合/无 TSV	222
15.4.3	TSV 的形成/没有堆叠	223
15.4.4	存储器	226

15.4.5	逻辑存储器	232
15.4.6	逻辑重新分区	233
15.4.7	代工厂和 OSAT 动态	233
15.4.8	其他 3D 应用	234
15.5	结论	235
	参考文献	235
第 16 章	用于三维集成和封装中的临时键合	238
16.1	引言	238
16.2	临时键合技术的选择	238
16.2.1	关键的要求	239
16.2.2	最重要的临时键合技术	240
16.3	成功处理的边界条件	243
16.3.1	均匀无空洞键合	243
16.3.2	在减薄和后续处理过程中晶圆边缘的保护	244
16.4	热机械的剥离方法证明的三维集成工艺	245
16.4.1	在 CMOS 图像传感器的器件晶圆上的后制作过孔工艺	245
16.4.2	宽长比 2:1 的后制作过孔工艺	246
16.4.3	采用高温 TEOS 工艺的 50 μm 深的后制作过孔工艺	247
16.4.4	使用互连过孔固液相互扩散工艺实现芯片到晶圆的堆叠	248
16.5	结束语	248
	参考文献	249
第 17 章	用于三维系统集成的合格芯片重构的临时黏合剂键合	250
17.1	采用 SLID 键合技术的芯片组装	250
17.2	重构	251
17.3	晶圆到晶圆 SLID 键合组装	252
17.4	超薄芯片的重构	253
17.5	结论	254
	参考文献	255
第 18 章	250$^{\circ}\text{C}$ 以上处理和冷键合剥离的薄晶圆支撑系统	256
18.1	引言	256
18.2	工艺流程	256
18.2.1	剥离层处理	257
18.2.2	载体晶圆处理	257
18.2.3	键合工艺	258
18.2.4	减薄	259
18.2.5	键合剥离工艺	260
18.2.6	设备	260
18.3	性能	260

18.3.1	器件晶圆厚度	260
18.3.2	厚度均匀性	261
18.3.3	稳定性	261
18.4	应用	261
18.4.1	带凸点晶圆的键合	262
18.4.2	超薄芯片的封装	262
18.4.3	TSV 处理	262
18.4.4	载体的重复利用	263
18.5	结论	263
	参考文献	263
第 19 章	临时键合：静电	264
19.1	基本原理：平行板之间的静电力	264
19.1.1	在一个平板电容器中的电场与静电力	264
19.1.2	在一个双极结构中的静电引力	265
19.1.3	Johnsen-Rahbek 效应	266
19.2	制造移动静电吸盘的技术概念	267
19.2.1	衬底材料的选择	267
19.2.2	薄膜介电层的选择	268
19.2.3	电极模式：材料与几何形状	268
19.2.4	可移动静电吸盘的实例	270
19.3	静电吸盘的特性	270
19.3.1	电学和热学特性，泄漏电流	270
19.3.2	CMOS 器件上静电场可能带来的影响	272
19.4	用于加工薄的和柔性衬底的静电吸盘	272
19.4.1	薄半导体晶圆的处理与转移	272
19.4.2	晶圆减薄和背面金属化	273
19.4.3	等离子工艺中的静电吸盘	273
19.4.4	静电吸盘形成薄晶圆的凸点	273
19.4.5	湿法化学环境中的静电吸盘	274
19.4.6	单芯片的静电操作	274
19.4.7	箔和绝缘衬底的加工	274
19.5	小结与展望	275
	参考文献	275