

微机电系统技术与应用丛书

微系统 封装原理与技术

邱碧秀 著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

微机电系统技术与应用丛书

微系统封装原理与技术

邱碧秀 著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

内 容 简 介

封装是一个跨领域的技术。本书全面系统性地介绍封装技术,旨在使读者能对此技术的全面了解和掌握。全书分为原理介绍、分析测试及应用三篇。在原理介绍部分,重点介绍电性设计、热管理、材料的选择和制程设计。在分析、测试方面,介绍产品的各种失效分析、可靠性设计及测试方法。在应用方面,涵盖不同产品(包括 IC、光电、微机电等)封装技术,介绍前瞻性的封装及封装技术的发展趋势。

本书可以作为大专理工院校封装方面课程教科书,或自我进修及实务上的参考用书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

微系统封装原理与技术 / 邱碧秀著. —北京: 电子工业出版社, 2006.9

(微机电系统技术与应用丛书)

ISBN 7-121-03031-4

I. 微… II. 邱… III. 微电子技术—封装工艺 IV. TN405.94

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 092567 号

责任编辑: 刘志红 特约编辑: 陈 虹

印 刷: 北京市天竺颖华印刷厂

装 订: 三河市金马印装有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×980 1/16 印张: 15 字数: 336 千字

印 次: 2006 年 9 月第 1 次印刷

定 价: 32.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系电话: (010) 68279077; 邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

作者简介:

邱碧秀

现任:

中国台湾交通大学电子工程系所教授, 为 IEEE 资深会员。

经历:

曾任中国台湾交通大学创新封装研究中心主任, 曾于封装相关领域发表国际期刊论文一百余篇; 中文著作有《电子陶瓷》徐氏基金会 (1988 年), 英文著作有 Thermal Stress and Strain in Microelectronic Packaging (editor: J. H. Lau, Von Nostrand Reinhold, 1993)。

研究领域:

高速资料传输之系统封装术。

自序

半导体封装测试产业占中国大陆半导体产业产值 25% 以上, 并且在全球也占有相当大的比重。由于半导体产业的急速发展, 现阶段的 IC 晶片设计与制造将日益复杂与精巧, 而封装技术必须同步提升, 才能维持大陆在半导体封测产业的全球竞争力。

本书的主要目的, 在于让读者全面了解封装。封装是一个跨领域的技术, 涵盖的范围包括电子、材料、物理、化学、机械等。每个工程师都可以就自己的专长对本领域做一些贡献, 但同时也需要具备和封装有关的其他领域基础知识, 才能纵观全局, 以团队合作的方式, 就产品的封装提供全面解决方案 (Total Solution)。

本书共 10 章。第 1 章是总论, 先对封装做概略性介绍; 第 2 章到第 4 章主要是原理介绍, 包括电性设计 (第 2 章)、热管理及应力、应变 (第 3 章)、材料选择和制程设计 (第 4 章); 第 5 章是失效分析及可靠性设计; 第 6 章是测试; 第 7 章到第 10 章则分别介绍 IC、光电、微机电及系统封装。本书可以作为高校理工科封装课程的教材, 以一学期课程而言, 第 2 章到第 5 章各约两星期的授课份量; 第 1 章及第 6 章到第 10 章各约一星期的授课份量; 也可作为相关技术人员的自学参考用书。本书撰写上尽量使文章内容前后呼应, 以达到最佳的学习效果。

目前, 市场上关于封装的书不多, 尤其是中文书更少, 对于有心学习此技术的在职人员及在校学生来说, 这是一大缺憾, 这也是笔者执笔此书的主要原因。

感谢上海复芯微电子技术咨询有限公司协助校稿及简化的一切事宜, 使本书能顺利在中国台湾地区出版后, 又得以在大陆出版, 并感谢台湾沧海出版社及北京电子工业出版社相关人员的努力。

最后要感谢中国台湾交通大学电子工程系为笔者提供了一个良好的教学与研究环境, 使本书的编写得以顺利完成, 也感谢我的家人、同事、朋友及学生们的帮忙及鼓励。

谨以此书敬献给挚爱我的父亲邱清溪先生及母亲邱桂英女士。

邱碧秀

2006 年 8 月

反侵权盗版声明

电子工业出版社依法对本作品享有专有出版权。任何未经权利人书面许可，复制、销售或通过信息网络传播本作品的行为；歪曲、篡改、剽窃本作品的行为，均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人应承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。

为了维护市场秩序，保护权利人的合法权益，我社将依法查处和打击侵权盗版的单位和个人。欢迎社会各界人士积极举报侵权盗版行为，本社将奖励举报有功人员，并保证举报人的信息不被泄露。

举报电话：(010) 88254396；(010) 88258888

传 真：(010) 88254397

E-mail: dbqq@phei.com.cn

通信地址：北京市万寿路 173 信箱

电子工业出版社总编办公室

邮 编：100036

读者调查表

尊敬的读者:

自电子工业出版社机电图书事业部开展读者调查活动以来,收到来自全国各地众多读者的积极反馈,他们除了褒奖我们所出版图书的优点外,也很客观地指出需要改进的地方。读者对我们工作的支持与关爱,将促进我们为您提供更优秀的图书。您可以填写下表寄给我们(北京万寿路 173 信箱机电图书事业部 邮编:100036),也可以发送电子邮件与我们取得联系(lzhmails@phei.com.cn),反馈您宝贵的建议和意见。我们将从中评出热心读者若干名,赠送我们出版的图书。感谢您对我们工作的支持!

您的意见
是我们创造
精品的动力
源泉!

姓名: _____ 性别: ☐ 男 ☐ 女 年龄: _____ 职业: _____

电话(手机): _____ E-mail: _____

传真: _____ 通信地址: _____

邮编: _____

1. 影响您购买同类图书因素(可多选):

☐封面封底 ☐价格 ☐内容提要、前言和目录 ☐书评广告 ☐出版社名声
☐作者名声 ☐正文内容 ☐其他 _____

2. 您对本事业部图书的满意度:

从技术角度 ☐很满意 ☐比较满意 ☐一般 ☐较不满意 ☐不满意

从文字角度 ☐很满意 ☐比较满意 ☐一般 ☐较不满意 ☐不满意

从排版、封面设计角度 ☐很满意 ☐比较满意 ☐一般 ☐较不满意 ☐不满意

3. 您选购了我们哪些图书? 主要用途?

4. 您最喜欢我们出版的哪几本图书? 请说明理由。

5. 您所教课程主要参考书? 请说明书名、作者、出版年份、定价、出版社。

6. 目前教学您使用的是哪本教材?(请说明书名、作者、出版年、定价、出版社)有何优缺点?

7. 您的相关专业领域中所涉及的新专业、新技术包括:

8. 您感兴趣或希望增加的图书选题有:

9. 您是否需要我们定期给您邮寄相关出版信息: ☐是 ☐否

邮寄地址: 北京海淀区万寿路 173 信箱机电图书事业部

邮编: 100036

电话: 010-88254473 E-mail: lzhmails@phei.com.cn

联系人: 刘志红

目 录

第 1 章 总论	(1)
1.1 封装的定义及重要性	(1)
1.2 封装的种类	(6)
1.3 设计及制程的重要议题	(9)
1.4 技术发展的趋势	(10)
参考文献	(11)
习题	(12)

第一篇 微系统封装的基本原理和技术介绍

第 2 章 电性设计概论	(15)
2.1 基本的电性参数	(16)
2.1.1 电阻	(16)
2.1.2 电感	(18)
2.1.3 电容	(19)
2.1.4 时间延迟	(21)
2.2 高频设计的考虑	(21)
2.2.1 传输线原理	(22)
2.2.2 特征阻抗	(24)
2.2.3 电磁波的反射	(29)
2.2.4 时域反射法	(34)
2.2.5 信号线损耗和集肤效应	(35)

2.3 噪声和串音.....	(36)
2.3.1 开关噪声.....	(36)
2.3.2 串音.....	(38)
2.3.3 电磁波干扰.....	(40)
2.4 设计的程序.....	(41)
参考文献.....	(44)
习题.....	(45)
第3章 热管理及应力、应变.....	(49)
3.1 基本热传学.....	(50)
3.1.1 传导.....	(51)
3.1.2 对流.....	(54)
3.1.3 辐射.....	(54)
3.1.4 热传模拟分析.....	(55)
3.2 封装的散热设计及方式.....	(60)
3.2.1 被动式散热.....	(61)
3.2.2 主动式散热.....	(64)
3.2.3 温度及热阻测量方法.....	(66)
3.3 应力和应变.....	(68)
3.3.1 重要名词的定义.....	(68)
3.3.2 热机械学基本方程式.....	(70)
参考文献.....	(75)
习题.....	(75)
第4章 材料选择和制程设计.....	(77)
4.1 基板材料及制程.....	(78)
4.1.1 陶瓷基板.....	(79)
4.1.2 塑料基板.....	(84)
4.1.3 其他基板.....	(85)
4.2 电介质.....	(87)

4.3	封装材料	(91)
4.4	导体及接合材料	(93)
4.4.1	导体材料	(94)
4.4.2	接合材料	(95)
4.5	接合制程	(101)
4.5.1	打线接合	(102)
4.5.2	卷带自动接合	(102)
4.5.3	覆晶接合	(104)
4.5.4	接合方法的比较	(106)
	参考文献	(107)
	习题	(107)

第二篇 微系统封装的分析及测试

第 5 章	失效分析及可靠性设计	(111)
5.1	失效机制及可靠性设计	(113)
5.2	失效分析	(124)
5.3	分析仪器及技术	(126)
5.3.1	X 光绕射分析	(128)
5.3.2	电子显微镜	(133)
5.3.3	其他常用仪器	(137)
5.3.4	表面分析技术	(137)
	参考文献	(141)
	习题	(142)
第 6 章	测试	(143)
6.1	前言	(143)
6.2	可靠性测试	(144)
6.2.1	Arrhenius 方程式	(145)
6.2.2	Arrhenius 方程式的适用性	(146)

6.3	可靠性计算	(148)
6.4	功能性测试	(152)
6.4.1	可测试设计	(153)
6.4.2	内建式自我测试	(154)
6.4.3	可修护性	(155)
6.4.4	基板的测试	(155)
	参考文献	(157)
	习题	(157)

第三篇 微系统封装的应用

第7章	IC 封装	(161)
7.1	前言	(161)
7.2	单芯片模块封装制程	(162)
7.3	先进 IC 封装技术	(164)
7.4	晶圆级封装	(164)
7.5	芯片尺寸封装	(166)
7.5.1	SLICC	(167)
7.5.2	SBB	(167)
7.6	多芯片模块封装	(169)
7.6.1	模块的定义	(170)
7.6.2	设计	(172)
7.6.3	封装、基板制作、组合及测试	(172)
	参考文献	(175)
	习题	(175)
第8章	光电封装	(177)
8.1	前言	(177)
8.2	光波导	(178)
8.3	光电转换、对位/耦合机制	(184)

8.3.1 光电转换·····	(184)
8.3.2 对位·····	(184)
8.3.3 耦合·····	(185)
8.4 光路和电路的整合·····	(188)
8.5 光电组件的封装·····	(190)
参考文献·····	(190)
习题·····	(191)
第 9 章 微机电系统封装 ·····	(193)
9.1 前言·····	(193)
9.2 MEMS 设计·····	(194)
9.3 MEMS 制程·····	(198)
9.3.1 蚀刻·····	(198)
9.3.2 制作流程·····	(199)
9.3.3 晶圆接合·····	(200)
9.4 RF MEMS·····	(203)
9.5 封装·····	(204)
参考文献·····	(205)
习题·····	(205)
第 10 章 系统封装 ·····	(207)
10.1 前言·····	(207)
10.2 3D 封装技术·····	(208)
10.3 埋入式被动组件·····	(211)
10.4 整合型基板·····	(213)
10.5 远景及挑战·····	(214)
参考文献·····	(216)
习题·····	(216)
附录 A 主要术语中英文对照 ·····	(217)

总 论

- ❖ 1.1 封装的定义及重要性
- ❖ 1.2 封装的种类
- ❖ 1.3 设计及制程的重要议题
- ❖ 1.4 技术发展的趋势

1.1 封装的定义及重要性

半导体集成电路 (IC) 技术的发展, 以及微系统产品应用上更轻、更薄、更短、更小、功能更佳、价格更低廉的要求, 促成了一连串的技术改进和突破。而封装 (Package) 也受产品特性的驱动, 在技术上产生了很大的变革。所谓的封装, 传统的定义是“提供给 IC 功率、电连接 (Interconnection)、冷却、保护、支撑及人机接口的方法或装置”。也就是说制造好的 IC 芯片, 我们无法马上使用, 必须要有适当的方法及装置提供电源去驱动它, 要为它的信号输入及输出配置适当的电连接, 让 IC 组件之间的信号传输顺畅; 要有适当的方式将 IC 组件在使用时产生的热量散发到空气中, 让组件不至于因过热而功能受损; 要能够保护组件, 免受外在环境 (例如水气、盐分、放射线等) 的破坏。而在科技快速发展的今日, 消费者的需求已经不局限于此。前述所提的封装功能, 早已被视为是应有的基本功能。现在所期望的是功能更好、价钱更便宜、外表更美观、易于携带等特性, 这些对产品特性的要求驱动了封装技术的变革及封装业经营形态的调整。

如图 1.1 所示, 封装技术由 1970 年以针插孔 (Pin-Through-Hole, PTH) 方式为主的双边引脚 (Dual In Line Package, DIP) 演变到表面黏着技术 (Surface Mount Technology, SMT), 功能得到提升; 由周边引脚 (例如 Quad Flat Package, QFP) 发展到球栅阵列 (例如 Ball Grid

Array, BGA), 脚数增多; 由小型化封装 (Small Outline Package, SOP) 发展到晶圆级封装 (Wafer Level Package, WLP), 降低了成本; 由单芯片模块发展到三维空间的堆栈模块 (Stack-Chip Scale Package, S-CSP)、多芯片封装 (Multi Chip Package, MCP) 及系统封装 (System on Package, SoP), 更进一步地小型化及高性能化; 芯片和基板的接合, 也由传统的打线接合发展到覆晶接合。初接触封装领域的读者若目前看不懂图 1.1 的各种英文缩写及本章中的文字叙述或图表, 不必担心, 笔者的建议是先将本章很快地浏览一遍之后, 仔细阅读各章的内容, 然后再回过头来细读第 1 章, 就会有深一层的领悟。因为封装技术涵盖的范围很广, 假如一开始就介绍技术性细节, 容易造成见树不见林的问题。所以, 在第 1 章总论中, 先介绍一些整体性概念, 在后面章节中会讨论各种相关的细节。

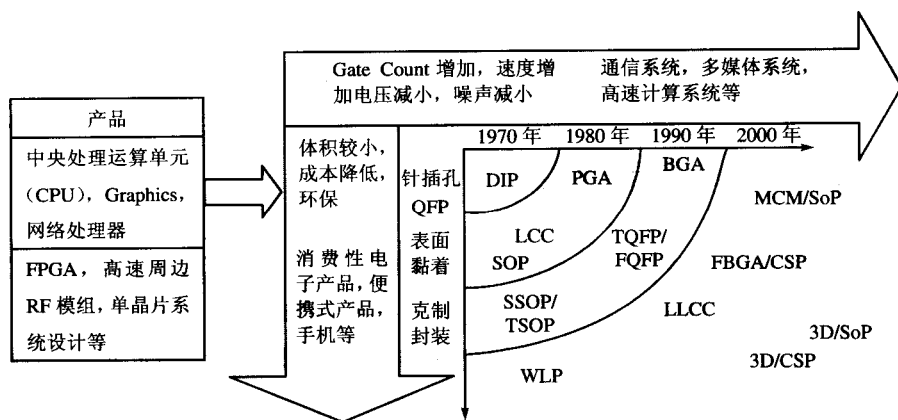


图 1.1 产品特性驱动封装技术之演进及变革

根据以上定义, 事实上, 所谓封装就是“将组件变成产品的过程”。这个过程可以很漫长, 也可以很短, 视产品系统的复杂性而定, 所以通常将封装分成不同的层级来讨论。如图 1.2 所示, 做好 IC 后在晶圆上的布线或配置焊锡凸块等, 称为第 0 层级封装; 将切割后的 IC 芯片组合成组件模块 (Module) 的过程称为第 1 层级封装; 将组件模块及被动组件组合到电路板的过程称为第 2 层级封装; 将电路板组合到母板的过程称为第 3 层级封装; 将母板组合成如图 1.2 所示的办公室自动化产品的过程称为第 4 层级封装。图 1.2 中还有第 1.5 层级封装, 指的是直接将芯片接合到电路板的过程 (Chip-On-Board, COB), 并未将芯

片先组合成组件模块（或称芯片模块）。另外，芯片模块还可分为单芯片模块（Single Chip Module, SCM）和多芯片模块（Multichip Module, MCM），这些概念稍后再做详细解释。

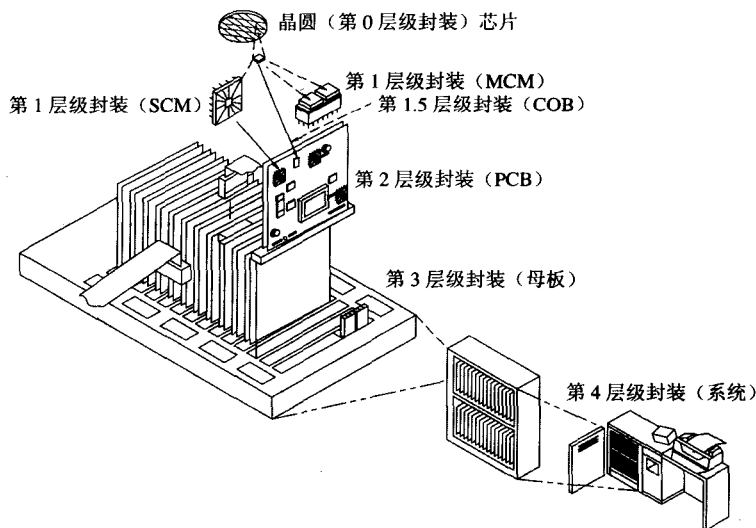


图 1.2 不同层级之封装示意图

由图 1.2 可知：一个产品需要多少层级的封装，事实上是由产品系统的复杂性、科技发展程度及成本预算来决定的。例如：一般的 CD 音响，芯片数目不到 10 个，只需做到第 2 层级的封装；个人计算机有数十个芯片，大概要做到第 3 层级的封装；而具有上千个芯片的大型计算机，可能就需要做到第 4 层级的封装。但事实上，需要多少层级的封装还和科技的发展息息相关，因为一个芯片可以执行的功能愈来愈多时，需要的芯片的数目却愈来愈少（例如目前正在研发的系统单芯片（System-on-a-Chip, SoC）就是要将所有的系统功能整合在单一芯片中），封装的层级数可因此而减少。但有时由于要降低成本，会在可达到功能性要求的前提下，舍弃较先进但价格较贵的封装技术，而使用技术层次较低但较价廉的封装。

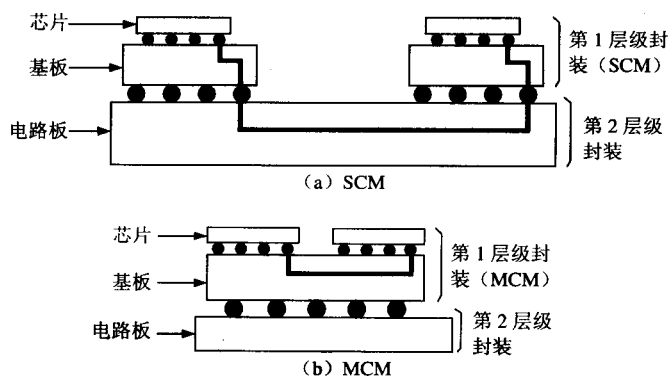
在产品高性能化及小型化的过程中，除了芯片技术不断提升外，封装的技术及制程也需要做相应的改善及简化，才能真正达到产品的高功能化及小型化。我们常说“无封装就是最好的封装”，因为基本上封装的过程是“多做多错，少做少错”，每多一道封装制程，就多一份成本开销，也多一个可能发生失效（Failure）的地方，所以“无封装化”是封装

的最高境界。但是根据封装所提供的功能，“无封装化”基本上是不可能的，所以我们所追求的真理是“最少的封装就是最好的封装”，当然其先决条件是满足各种功能上的要求。表 1.1 中列出了各种层级的封装及接合方法，共有 7 个层级。而本书所讨论内容大部分是到第 2 层级封装为止，原因是一般所谈的封装技术大多只涵盖到第 2 层级，第 0 层级到第 2 层级封装是所有产品都需要的。第 3 层级以后的封装只有较大的系统才需要，并且其所考虑的技术内容和第 3 层级以前的封装不同，故本书中略而不谈。

表 1.1 各种封装阶层和接合方法

阶层	目的	方法	互连间距
0	在芯片上布电连接及焊锡凸块	PVD、CVD 及电镀	
1	将芯片接合到基板上，成为模块	打线接合、卷带自动接合 (TAB)、覆晶接合	0.05 mm~0.25 mm
2	将芯片模块/被动组件接合到电路板上	PTH、SMT	0.1 mm~5.0 mm
3	将电路板接合到母板	PTH、接合器 (Connector)	1.0 cm~5.0 cm
4	母板间的接合 (见图 1.2，暂称之为 Cabinet)	接合线缆 (Cable) 及接合器	>5.0 cm
5	Cabinet 间的接合 (例如：接合成区域性网络)	电缆线、光纤电缆、电磁波 (无线通信)	
6	区域性网络的接合 (例如：接合成一个通信网路)	电缆线、光纤电缆、电磁波 (无线通信)	

图 1.2 中的第 1 层级封装还分成单芯片模块和多芯片模块。所谓 SCM 是指一个模块里面只装一个芯片，而 MCM 是指一个模块里装两个或两个以上的芯片。由剖面示意图 (图 1.3) 中可看到，SCM 芯片间的信号传输经过模块内芯片的基板后，还要到电路板绕一大段路才能到达另一芯片 (如图 1.3 (a) 所示)，而 MCM 芯片间的信号传输在模块内芯片的基板中就可完成 (如图 1.3 (b) 所示)，信号的传输速度提升许多。前面提到“最少的封装就是最好的封装”，MCM 对封装的最少化是有很大益处的。但 MCM 有个致命伤，就是所谓的良质芯片 (Known Good Die, KGD) 的问题。一个 MCM 内装多个芯片，若其中任何一个芯片有缺陷，则需返工——将该芯片换掉，甚至将整个模块废弃掉。在早年芯片的良率 (Yield) 不高时，这样做造成 MCM 成本上一个很大的负担，所以在几十年前就有人看到 MCM 的优点并且极力提倡，但 MCM 一直无法在封装产业上占一席之地。近年来因科技进展，IC 芯片良率大幅提升，MCM 重新定义，亦称为 MCP (Multi Chip Package)。



注：此图第1层级是用覆晶接合，第2层级的接合是用BGA。

图 1.3 芯片间信号传输路径示意图

多芯片模块的定义是：一个封装结构体，内含多个 IC 芯片，芯片间由一个共享的电路基板内的导体做电连接。多芯片模块可依其所用的电路板种类分为 MCM-L、MCM-C 和 MCM-D 3 种。MCM-L (L 代表层叠 (Laminated)) 指基板是由铜导体和高分子聚合物 (塑料) 所层叠而成的印刷电路板的 MCM；MCM-C 指基板是由厚膜网帘印刷 (Thick Film Screen Printing) 导体和陶瓷胚片共烧而成的陶瓷基板 (C 代表共烧 (Cofired)) 的 MCM；而 MCM-D 指基板是由金属导体薄膜沉积在电介质薄膜下所形成的基板 (D 代表沉积 (Deposited)) 的 MCM。基板的材料和制程将放在 4.1 节中讨论，SCM 及 MCM 的 IC 封装将在第 7 章讨论。

图 1.4 为 MCM 及 SCM 结构剖面的示意图。在此所要强调的是：MCM (SCM) 就是一个模块里有多 (一) 个芯片，如此而已，和它所用接合技术毫无关系。所以读者可以发现笔者刻意用不同的方式来呈现图 1.4 和图 1.3 的 MCM 及 SCM。图 1.4 (a) 中 SCM 的第 1 层级接合是用打线接合的；第 2 层级接合是用导线架做针插孔 (PTH) 的接合。而图 1.3 (a) 中 SCM 的第 1 层级接合是用覆晶接合；第 2 层级接合是用 BGA 接合 (属于 SMT 的接合方式)。图 1.3 (b) 中 MCM 第 1 层级接合是用覆晶接合；第 2 层级接合是用 BGA 接合。而图 1.4 (b) 中 MCM 则刻意强调第 1 层级的接合可以有打线接合、覆晶接合及卷带自动接合 (当然在实际制程上不会自找麻烦，在一个基板上用 3 种接合方式，这里只是说明有 3 种选择而已，制程上还是要挑其中一种来做)，第 2 层级的接合可以用针插孔或 SMT 的方法 (图 1.4 所示为针插孔接合)。接合方法有多种 (见表 1.1)，这在