



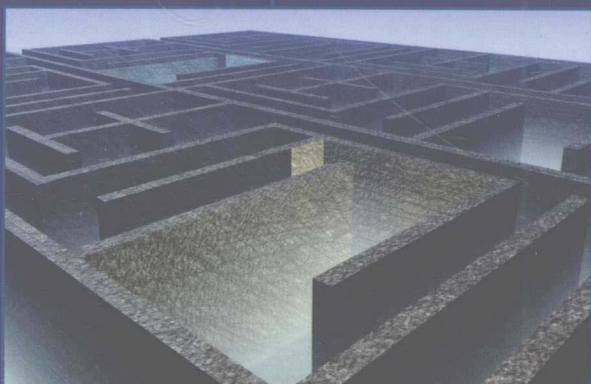
国际信息工程先进技术译丛

先进封装材料

Materials for Advanced Packaging

(美) Daniel Lu 编
C.P.Wong
陈明祥 尚金堂 等译

机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



国际信息工程先进技术译丛

先进封装材料

(美) Daniel Lu

C. P. Wong 编

陈明祥 尚金堂 等译

机械工业出版社

译者序

从芯片到器件或系统的整个工艺过程称为封装，芯片只有经过封装才能成为产品，投入使用。封装的主要功能是提供机械支撑与保护，实现电源与信号的连接。随着电子产品朝着高性能、多功能、高可靠、小型化、便携化及低成本方向发展，对电子封装提出了新的要求。例如，随着三维封装和系统集成度的提高、功率密度加大，封装散热成为影响器件性能的主要因素；对于大功率 LED 封装而言，除加强散热外，提高出光效率也是封装过程中需要重点考虑的方面。解决这些问题都有赖于封装技术（材料、结构和工艺）的不断改进和提高。

在半导体产业中，封装业作为市场需求量大、投资收益快、发展迅速的高技术产业，一直是发展中国家进军半导体产业的捷径，我国也不例外。据赛迪顾问统计，我国的半导体封装业一直占据着整个半导体产业的半壁江山，是半导体产业链中最具规模、最先发展的一个行业。封装技术的重要支撑是封装材料，相对国内电子封装产业快速发展的现状来说，封装材料方面的发展显得不相适应（主要体现在我国生产的封装材料配套不齐，且质量不够稳定）。如果说我国的封装产业已从芯片生产的附属位置转变为一个独立的产业，那么封装材料产业还在封装产业的附属位置上徘徊，还不能形成一个完整的独立产业，适应不了当前封装产业飞速发展的需要。

原书《先进封装材料》是一本为数不多的关于电子封装材料的重要著作，编者汪正平（C. P. Wong）是美国工程院院士、佐治亚理工学院资深教授、电子封装领域的权威专家。2008 ~ 2009 年，当我们在美国佐治亚理工学院封装研究中心（Packaging Research Center, PRC）从事访问研究期间，合作导师即为汪正平（C. P. Wong）教授，有幸拜读了汪教授主编的原书，立即被其内容和前瞻性所吸引。从内容上看，原书不仅收录了国际知名学者对封装材料的最新见解，包括引线键合材料、无铅焊料、基板材料、倒装芯片底部填充料、环氧模塑料、导电胶、热界面材料、纳米封装材料等；还涉及电子封装技术的最新发展，包括三维集成、系统封装（硅片减薄、填孔）、纳米封装与互联、圆片级封装、MEMS 封装、LED 封装等前沿领域。特别是原书提供了大量的参考文献，为读者参考国内外相关研究情况提供了全面的背景资料。坦率地说，我们近年来也多次参加电子封装领域的学术会议，包括在美国召开的电子器件与技术会议（Electronic Components and Technology Conference, ECTC）和我国召开的电子封装技术暨高密度封装国际会议（International Conference on Electronic Packaging Technology & High Density Packaging, ICEPT-HDP）年会，涉及封装材料和工艺的论文都占据了很大篇幅。虽然我国近几

年也出版和翻译了一些关于封装材料的书籍，但大多围绕微电子封装。鉴于电子封装技术的飞速发展，对封装材料和工艺技术的介绍和及时更新就显得非常必要。我们想，这也是汪教授主编《先进封装材料》的初衷。因此，回国后，在征得汪正平教授同意，在机械工业出版社的大力支持下，我们决定尽快翻译原书，以飨国内的同仁。希望本书的出版对国内的封装技术，特别是封装材料和工艺研发人员有所帮助。

本书主要由陈明祥和尚金堂负责翻译、校核和协调工作。其中，陈明祥翻译第1、7、12、17、19章，蔡明先翻译第2、3章，曹斌翻译第4、6章，彭聪翻译第5、16章，秦顺金、张迪、尚金堂翻译第8、9、11章，杨亮翻译第10章，皮智华翻译第13章，吕植成翻译第14章，焦峰翻译第15章，罗小兵翻译第18章。此外，徐天明负责译校第4、6章，徐建译校第10章，吕强译校第13、15章，其余由陈明祥、尚金堂负责译校。

本书是在原著者吕道强（Daniel Lu）博士、汪正平（C. P. Wong）教授和Springer出版社的委托和授权下翻译的，在此对他们所给予的信任表示感谢。感谢华中科技大学刘胜教授、罗小兵教授对全书翻译工作的支持。感谢机械工业出版社牛新国社长和王欢编辑等有关人员的辛勤劳动，在他们的帮助下，本书得以顺利出版。另外也要特别感谢参与本书审稿的朋友，他们的参与使得本书更加出色。

因翻译和学术水平有限，译书中肯定有错译、误译和不恰当之处，恳请广大读者给予批评指正。

译 者

2011年10月

前 言

在过去的几年，由于经常参加一些电子封装会议如 IEEE 电子器件与技术会议 (Electronic Components and Technology Conference, ECTC)，我们目睹了电子封装技术各方面的进步，特别是在封装材料与工艺方面所取得的进展。所以，为了让读者了解电子封装的最新进展，我们决定推出本书。

本书广泛地综述了先进封装技术的最新发展，包括三维 (3D) 封装、纳米封装、生物医学封装等新兴技术，并重点介绍了封装材料与工艺方面的进展。本书包括 19 章，分别由业内公认的专家撰写，第 1 章回顾了三维封装的结构及可用于三维封装的材料与工艺；第 2 章评述了一些新的键合与连接技术，这些技术为电互连或机械互连提供了大面积无空洞的封装界面；第 3 章介绍了一些用于集成电路 (IC) 与基板间互连的新兴技术，用于提高电学与机械特性；第 4 章介绍了有关引线键合的最新进展；第 5、9、10、11、12、13 章介绍了一些关键封装材料的最新进展，包括无铅焊料、倒装芯片底部填充料、环氧模塑料、导电胶、芯片贴片胶/贴片膜以及热界面材料 (TIM)；第 6 章回顾了各种圆片减薄技术和有关材料与工艺；第 7、8 章介绍了有机基板与印制电路板的进展；第 14 章回顾了嵌入式无源器件包括电容、电感及电阻所用的材料；第 15、18 及 19 章包括纳米封装、发光二极管 (LED) 与光学封装、生物医学封装等在内的新技术；第 16、17 章则分别介绍了用于微电子机械系统 (MEMS) 中的材料和工艺，以及圆片级芯片尺寸封装技术。

感谢所有为本书的出版而作出贡献的人们。

目 录

译者序

前言

第 1 章 三维集成技术综述	1
1.1 简介	1
1.1.1 三维集成技术分类	1
1.1.2 三维集成驱动力	3
1.2 技术描述	8
1.2.1 三维片上集成	8
1.2.2 含硅穿孔的三维 IC 堆栈结构	10
1.2.3 三维封装	31
1.3 三维集成技术的主要问题	35
1.3.1 三维 IC 堆栈问题	35
1.3.2 三维封装问题	37
1.4 结论	38
参考文献	39
第 2 章 先进键合/连接技术	43
2.1 粘胶键合技术	43
2.1.1 电子工业用胶	43
2.1.2 粘合剂在电子产品中的应用	45
2.1.3 新型粘合剂	45
2.2 直接键合方法	47
2.2.1 阳极键合	47
2.2.2 扩散键合	48
2.2.3 表面活化键合	49
2.2.4 新型 Ag-Cu 直接键合	50
2.3 无铅焊接与键合工艺	51
2.3.1 基本钎焊工艺	51
2.3.2 去除锡氧化物的无助焊剂工艺	52
2.3.3 无氧化无助焊剂钎焊技术	53
2.3.4 无助焊剂倒装芯片互连技术	57

参考文献	59
第3章 先进的芯片与基板连接技术	63
3.1 引言	63
3.1.1 ITRS 中的倒装芯片连接	64
3.1.2 I/O 电学模拟	65
3.1.3 力学模拟	68
3.2 采用焊料的柔性 I/O 结构	70
3.2.1 外围与倒装芯片面阵列结构	70
3.2.2 使用面阵列焊料 I/O 的再分布	70
3.2.3 圆片级柔性 I/O	71
3.3 改善力学性能的焊料帽层结构	73
3.4 无焊料芯片-基板互连	74
3.4.1 铜互连	75
3.4.2 电镀铜柱阵列	79
3.4.3 柔性金凸点互连	80
3.4.4 化学镀 NiB 互连	81
3.5 芯片与基板连接的未来需求和解决方案	82
3.5.1 芯片外超高频高带宽运行	82
3.5.2 满足热管理的微流体互连	84
参考文献	86
第4章 先进引线键合工艺——材料、方法与测试	89
4.1 简介	89
4.2 互连要求	93
4.3 键合原理	95
4.3.1 引线键合类型	95
4.3.2 热压键合	96
4.3.3 超声键合	99
4.3.4 热超声键合	99
4.3.5 其他技术	101
4.3.6 设备优化	101
4.4 键合材料	102
4.4.1 键合引线	102
4.4.2 焊盘	105
4.4.3 镀金	108
4.4.4 焊盘清洗	109
4.5 测试	111

4.6	质量保证	117
4.7	可靠性	118
4.7.1	金属间化合物	119
4.7.2	凹坑	121
4.8	设计(线宽,弧线高度)	122
4.9	新概念	124
4.9.1	微间距	124
4.9.2	软衬底	126
4.9.3	高频键合	128
4.9.4	螺栓凸点技术	132
4.9.5	极高温环境	132
4.10	总结	136
	致谢	137
	参考文献	137
第5章	无铅焊接	143
5.1	全球无铅焊接行动	143
5.2	主要无铅焊料合金	144
5.2.1	SnCu (+掺剂(如Ni、Co、Ce))	144
5.2.2	SnAg (+Cu、+Sb、+掺剂(如Mn、Ti、Al、Ni、Zn、Co、Pt、P、Ce))	145
5.2.3	SnAg (+Bi、+Cu、+In、+掺剂)	145
5.2.4	SnZn (+Bi)	146
5.2.5	BiSn (+Ag)	146
5.3	无铅焊膏	147
5.4	无铅焊料表面处理	150
5.4.1	无铅焊料表面处理类型	150
5.4.2	表面处理性能	151
5.5	无铅焊接器件	154
5.5.1	温度耐受力	154
5.5.2	湿度敏感等级	154
5.6	用于无铅焊接的衬底材料	155
5.6.1	热分解	155
5.6.2	尺寸稳定性	156
5.7	无铅回流焊组装	156
5.7.1	设备	157
5.7.2	回流曲线	157
5.7.3	特殊曲线	158
5.8	无铅波峰焊组装	160

5.8.1 无铅波峰焊工艺	160
5.8.2 PCB 设计	160
5.8.3 设备侵蚀	161
5.8.4 厚 PCB 通孔填充	161
5.9 无铅焊点检查	162
5.10 无铅焊点返修	163
5.10.1 手机返修	163
5.10.2 BGA 返修	163
5.11 无铅焊点可靠性	164
5.11.1 微结构	164
5.11.2 焊点金属间化合物	164
5.11.3 温度循环	167
5.11.4 焊点脆性	168
5.12 总结	171
参考文献	171
第 6 章 硅片减薄工艺	176
6.1 薄硅器件	176
6.1.1 薄硅片优点	176
6.1.2 制作薄硅片的基本考虑	177
6.2 降低圆片厚度	178
6.2.1 材料去除	178
6.2.2 研磨过程	179
6.2.3 薄圆片夹持	182
6.3 薄圆片机械性能	184
6.3.1 断裂强度与弹性	184
6.3.2 表征研磨过程中产生的应力与损伤	186
6.3.3 圆片减薄限制	187
6.4 硅片切割	188
6.4.1 机械划片	188
6.4.2 激光划片	189
6.4.3 减薄分割硅片	191
6.4.4 通过损伤来分割硅片	191
6.5 薄硅芯片封装	192
参考文献	193
第 7 章 先进基板材料与工艺展望	195
7.1 简介	195

7.1.1 历史简述: 从 PCB 到基板	196
7.2 陶瓷基板	198
7.3 有机基板	198
7.3.1 两层 PBGA 基板	199
7.3.2 四层 PBGA 基板	202
7.3.3 六层 PBGA 基板	203
7.3.4 高密度互连基板	204
7.4 载带球栅阵列	206
7.5 PBGA 基板发展趋势	207
7.5.1 低成本电介质	207
7.5.2 低成本焊料掩膜	208
7.5.3 薄基板、薄电介质	208
7.5.4 低膨胀电介质	209
7.5.5 表面处理	209
7.6 FCBGA 基板	212
7.7 无芯基板	215
7.8 特种基板	216
7.8.1 射频模块基板	216
7.8.2 具有低介电常数的高性能基板	217
7.8.3 含嵌入式器件的基板	218
参考文献	219
第 8 章 先进印制电路板材料	221
8.1 介电材料	221
8.1.1 树脂体系	223
8.1.2 增强材料	226
8.1.3 填充料	232
8.2 导电材料	233
8.2.1 铜箔	233
8.2.2 表面涂层	236
8.3 印制电路板材料电气方面的考量	238
8.3.1 介电常数	239
8.3.2 介电损耗	242
8.3.3 湿度对电气性能的影响	243
8.3.4 传导损耗	244
8.4 印制电路板材料可靠性	245
8.4.1 导孔可靠性	246
8.4.2 导电阳极丝	247

8.4.3 球垫坑裂	248
8.4.4 焊点可靠性	248
参考文献	249
第9章 倒装芯片底部填充胶材料、工艺与可靠性	250
9.1 简介	250
9.2 常见的底部填充材料与工艺	252
9.3 倒装芯片底部填充封装的可靠性	254
9.4 底部填充胶面临的新挑战	257
9.5 不流动底部填充	259
9.5.1 向不流动底部填充胶中添加二氧化硅填充物的方法	262
9.6 模塑料底部填充	265
9.7 圆片级底部填充	266
9.8 总结	270
参考文献	271
第10章 用于半导体芯片封装的环氧模塑料发展趋势	276
10.1 简介	276
10.2 环氧模塑料介绍	277
10.2.1 环氧树脂	278
10.2.2 硬化剂	279
10.2.3 有机填料	279
10.2.4 促凝剂	280
10.2.5 硅烷偶联剂	280
10.2.6 阻燃剂	280
10.2.7 其他添加剂	281
10.3 环氧模塑料成型工艺	281
10.4 成模特性	282
10.5 抗湿气回流特性	283
10.5.1 抗湿气回流特性简介	283
10.5.2 机理	284
10.5.3 改善抗湿气回流特性	285
10.6 改善面阵列封装翘曲	289
10.7 低 k 芯片模压方面的挑战	290
10.7.1 控制应力	290
10.7.2 有限元模拟研究	291
10.7.3 EMC评估	292
10.8 未来趋势	294

参考文献	294
第 11 章 导电胶	295
11.1 引言	295
11.2 各向异性导电胶	295
11.2.1 概述	295
11.2.2 种类	296
11.2.3 粘合剂基体	297
11.2.4 导电填充物	297
11.3 使用各向异性导电胶的倒装芯片应用	298
11.3.1 采用凸点的 ACA 倒装芯片	299
11.3.2 基于玻璃芯片基板的 ACA 凸点倒装芯片	301
11.3.3 基于高频应用的 ACA 凸点倒装芯片	302
11.3.4 基于无凸点倒装芯片的 ACA	302
11.3.5 基于 CSP 和 BGA 应用的 ACA 倒装芯片	304
11.3.6 SMT 应用	305
11.3.7 失效机理	305
11.4 各向同性导电胶描述	306
11.4.1 电学导通的浸透理论	306
11.4.2 粘合剂基体	307
11.4.3 导电填充物	308
11.5 使用各向同性导电胶的倒装芯片应用	309
11.5.1 工艺	310
11.5.2 基于金属凸点的倒装芯片连接点	312
11.5.3 基于无凸点芯片的 ICA 工艺	313
11.6 ICA 在微电子封装中的应用	313
11.6.1 表面组装应用	313
11.6.2 ICA 连接点高频性能	314
11.6.3 ICA 连接点疲劳寿命	315
11.7 提高 ICA 电导率	316
11.7.1 消除润滑剂层	316
11.7.2 增强收缩	316
11.7.3 瞬态液相填充物	316
11.8 提高接触电阻稳定性	317
11.8.1 电阻增大原因	317
11.8.2 稳定接触电阻方法	318
11.9 提高抗冲击性能	319
11.9.1 环氧端基聚亚氨酯体系	319

参考文献	320
第 12 章 贴片胶与贴片膜	327
12.1 贴片材料	327
12.1.1 电子封装趋势	327
12.1.2 贴片材料发展趋势	329
12.1.3 贴片材料要求	330
12.1.4 贴片膏	330
12.1.5 LOC 封装胶带	331
12.1.6 贴片膜	332
12.1.7 未来的先进贴片膜	333
12.2 贴片膜发展——用于提高封装抗裂性和先进封装可靠性	334
12.2.1 介绍	334
12.2.2 贴片膜主剂设计	336
12.2.3 具有封装抗裂性的贴片膜	337
12.2.4 先进封装贴片膜	342
参考文献	347
第 13 章 热界面材料	350
13.1 热界面材料	351
13.2 导热界面建模最新进展	353
13.2.1 热导率 (k_{TM}) 预测模型	355
13.2.2 预测热界面材料粘合层厚度 (BLT) 的流变学模型	356
13.2.3 填充颗粒体积分数对热界面材料体热阻影响	357
13.2.4 接触热阻预测模型	358
13.3 聚合物热界面材料可靠性	360
13.4 合金焊料热界面材料	362
13.5 基于纳米技术的热界面材料	362
13.6 热界面材料性能表征	363
13.7 前景展望	364
参考文献	365
第 14 章 嵌入式无源元件	368
14.1 嵌入式电感	368
14.1.1 引言	368
14.1.2 磁性电感器建模与设计考虑	372
14.1.3 嵌入式封装体上和芯片上电感器——实验与分析	376
14.1.4 嵌入式磁电感器未来的发展方向	382

14.2 嵌入式电容器	384
14.2.1 嵌入式电容器的电介质选择	384
14.2.2 新概念与当前发展趋势	387
14.2.3 小结	390
14.3 嵌入式电阻	391
14.3.1 前言	391
14.3.2 技术障碍	391
14.3.3 电阻基础	393
14.3.4 材料与加工技术	394
14.3.5 射频产品中 LCP 上的薄膜电阻	397
14.3.6 小结	398
致谢	398
参考文献	399
第 15 章 纳米材料与纳米封装	404
15.1 纳米封装——微电子封装中的纳米科技	404
15.1.1 简介	404
15.1.2 纳米颗粒	405
15.1.3 其他纳米研究主题	406
15.2 纳米焊料	407
15.3 CNT	411
15.3.1 介绍	411
15.3.2 CNT 用于电气互连	411
15.3.3 CNT 用于散热	412
15.3.4 微系统与 CNT 集成	413
15.3.5 总结及未来需求	415
15.4 纳米发电机——原理、制作及封装	415
15.4.1 简介	415
15.4.2 采用 ZnO 纳米线的纳米发电机	416
15.4.3 ZnO 纳米阵列的定向生长	423
15.4.4 纳米发动机组装与封装	428
15.4.5 总结	432
参考文献	432
第 16 章 圆片级芯片尺寸封装	440
16.1 简介	440
16.2 圆片级芯片尺寸封装定义	440
16.3 用于凸点与再分配技术的材料与工艺	443

16.3.1 圆片凸点制作金属	444
16.4 无源器件集成材料	477
参考文献	481
第 17 章 微机电系统与封装	484
17.1 简介	484
17.2 MEMS 封装	486
17.3 用于封装的 MEMS 器件	493
17.4 用于制造 MEMS 的封装	495
17.5 机遇与主要挑战	497
17.6 结论	502
致谢	502
参考文献	503
第 18 章 LED 和光学器件封装与材料	506
18.1 背景	506
18.1.1 绪论	506
18.1.2 大功率 LED 封装材料挑战与解决方案	508
18.1.3 热稳定和紫外稳定 (长寿命) 塑封材料	510
18.1.4 应力与脱层	511
18.1.5 可靠性与寿命	512
18.2 封装功能	512
18.2.1 塑封与保护	513
18.2.2 出光效率	513
18.2.3 光学	516
18.2.4 电连接	517
18.2.5 散热	517
18.3 LED 与光电器件封装材料	518
18.3.1 标准 LED 塑封材料	518
18.3.2 大功率 LED 塑封材料	529
18.3.3 光学透镜材料	534
18.3.4 光学芯片键合材料	535
18.3.5 大功率 LED 用 PCB 材料	536
18.4 材料、LED 性能与可靠性	540
致谢	542
参考文献	542
第 19 章 数字健康与生物医学封装	546

19.1	简介	546
19.2	保健发展趋势——医疗器件和电子封装的机遇与挑战	546
19.2.1	保健趋势与主要驱动力	546
19.2.2	保健趋势对电子封装机遇与挑战影响的意义	547
19.3	植入式医疗器件的外部封装	548
19.3.1	生物气密性	548
19.3.2	电学兼容性	548
19.3.3	机械要求	549
19.3.4	电学通路	549
19.3.5	内部封装	550
19.3.6	软错误与单一事件不适	552
19.4	医疗器件探头	552
19.4.1	探头评述	552
19.4.2	探头连接器	553
19.4.3	导体	554
19.4.4	绝缘	555
19.4.5	电极	556
19.5	植入式生物医学传感器	557
19.5.1	植入式传感器综述	557
19.5.2	用于诊断肠胃的传感器	558
19.5.3	植入式压力传感器	559
19.5.4	用于失眠症的植入式传感器	560
19.5.5	用于脊椎矫正的植入式传感器	561
19.5.6	植入式葡萄糖传感器	561
19.6	芯片诊断传感器——机遇与挑战	562
19.6.1	介绍	562
19.6.2	微系统、生物 MEMS 和生物芯片	563
19.6.3	传感器技术平台	563
19.6.4	生物芯片封装问题与挑战	566
	参考文献	567

第 1 章 三维集成技术综述

Rajen Chanchani

摘要：只有采用三维结构，才能满足下一代集成微系统技术不断增长的功能和性能方面的需求。三维集成的首要驱动力是微型化和性能要求，将不同技术集成在一个小的空间。三维集成技术可以分成三类，即三维片上集成、三维 IC 堆栈和三维封装。本章对这三类三维集成技术进行了详细评述。

关键词：微系统，三维集成，芯片堆栈，硅穿孔，圆片键合。

1.1 简介

图 1.1 给出了一个包含 5 个独立微系统功能模块的集成微系统实例。传统意义上，这些不同的功能模块一般集成在二维封装管壳或印制线路板（Printed Wiring Board, PWB）上^[1]。在三维结构中，这些功能模块可以垂直堆叠，每个模块都可以成为堆栈结构中的独立层。每一层都可以通过层间垂直互连线连接在一起。对于三维集成，微系统的空间尺寸大大降低，也就是说 X 和 Y 方向的尺寸大大减小，同时 Z 方向的尺寸增长也很小。尺寸降低导致功能模块间互连线长度降低，而互连线长度的降低将提高系统性能，这将在下一节中详细解释。

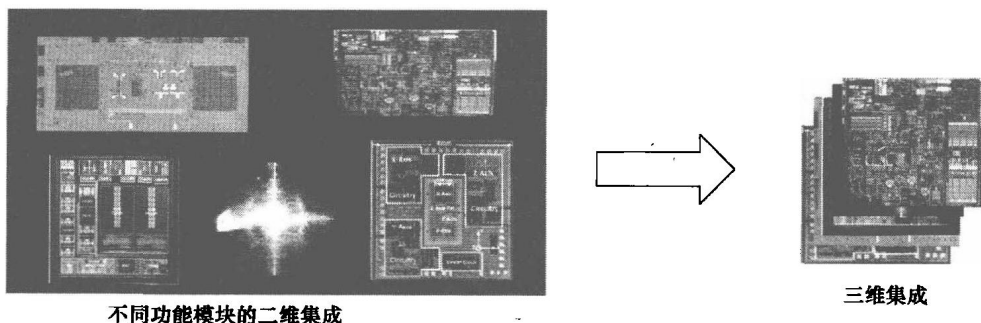


图 1.1 二维和三维集成微系统

1.1.1 三维集成技术分类

虽然三维集成是一个相对较新的概念，但在研究和实施过程中仍出现了很多不同的技术。这些技术可以分成三大类^[2]。