

微 纳 系 统 系 列 译 丛

# FUNDAMENTALS OF MICROSYSTEMS PACKAGING

## 微系统封装基础

[美国] Rao R. Tummala / 著

黄庆安 唐洁影 / 译



东南大学出版社

# 微系统封装基础

FUNDAMENTALS OF  
MICROSYSTEMS PACKAGING

[美国] Rao R. Tummala 著  
黄庆安、唐洁影 译

东南大学出版社

## 内 容 提 要

本书是国际上第一本微系统封装的参考书。内容包括:微电子、光子、RF、MEMS 的基础知识;微系统单芯片、多芯片、圆片级封装技术;IC 装配技术、电路版装配技术及封装材料;微系统封装的电性能、热性能、可靠性设计;同时介绍了微系统的主要应用领域。

本书内容从基础开始,系统全面地介绍了微系统封装技术。适合微电子、光子、RF 通信和 MEMS 等相关专业高年级本科生、研究生、教师阅读,也适合相关科研人员和工程技术人员作为专业参考书。

Rao R. Tummala: Fundamentals of Microsystems Packaging.

ISBN: 0-07-137169-9

Copyright © 2001 by The McGraw-Hill Companies, Inc.

No part of this publication may be reproduced or distributed in any form or by any means, or stored in a data base or retrieval system, without the prior written permission of the publisher. All rights reserved.

本书中文简体字翻译版由麦格劳-希尔授权东南大学出版社独家出版发行。未经出版者预先书面许可,不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。版权所有,翻印必究。

图字:10-2004-006

### 图书在版编目(CIP)数据

微系统封装基础/黄庆安、唐洁影译. —南京:东南大学出版社,2004.12

ISBN 7-81089-419-6

I. 微... II. ①黄... ②唐... III. 封装工艺  
IV. TN405

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 114934 号

东南大学出版社出版发行  
(南京四牌楼 2 号 邮编 210096)

出版人 宋增民

江苏省新华书店经销 兴化市印刷厂印刷

开本:700mm×1000mm 1/16 印张:56.5 字数 1107 千字

2005 年 2 月第 1 版 2005 年 2 月第 1 次印刷

印数 1-2500 定价 148.00 元

(凡因印装质量问题,可直接向发行部调换。电话:025-83795801)

## 序

微机电系统 (Micro-electro-mechanical systems, MEMS) 是指可以批量制造的、集微结构、微传感器、微执行器以及信号处理和控制电路等于一体的器件或系统。其特征尺寸范围一般在  $0.1\ \mu\text{m} \sim 100\ \mu\text{m}$ 。目前国际上通常将 MEMS 冠以 Inertial-, Optical-, Chemical-, Bio-, RF-, Power- 等前缀以表示其不同的应用领域。MEMS 利用了当今科学技术的许多尖端成果,更重要的是它将信息处理与敏感及执行机构相结合,改变了人们感知和控制外部世界的方式。

和 IC 一样, MEMS 器件最终需要经过封装才能与其他器件或系统搭配工作。但相对 IC 封装而言, MEMS 封装技术难度更大,对 MEMS 产品的性能、质量和成本的影响更加突出。一般来说, IC 制造中采用的低成本封装技术只能适用于一部分 MEMS。而大多数 MEMS 器件中包含活动部件,往往需要采用特殊的技术和材料才能实现其电信号与非电信号的相互作用,而且器件种类繁多,从而大大增加了封装的难度和成本。值得关注的是, MEMS 的封装成本往往占到整个器件成本的 70% 左右。总之,无论从 MEMS 技术的研究开发来看,还是从产业化发展的需求而言, MEMS 封装已经成为亟待解决的关键问题。

到目前为止,国内系统阐述 MEMS 封装技术方面的工具书还比较少见。美国 Tummala 教授组织 50 位专家所写的《微系统封装基础》是一本关于微系统封装方面的基础教科书,书中定义微系统包括了微电子、光子、RF 和 MEMS,其内容主要包括:(1)微电子、光子、RF 和 MEMS 相关的基本概念;(2)微系统封装的基本技术,例如单芯片封装、多芯片封装、圆片级封装、IC 装配、电路板装配以及封装材料等;(3)微系统封装过程需要考虑的电性能、热性能、可靠性设计等问题;(4)微系统主要应用领域。总的来看,该书基本概念比较清楚,具有一定的参考价值,适合于高年级本科生、研究生和相关科技人员阅读。

东南大学黄庆安教授长期从事 MEMS 教学和科研工作,对国内 MEMS 技术研发和产业化发展常有独到而敏锐的见解,这一次又适时地把《微系统封装基础》一书介绍到国内,值得赞赏,同时也向为翻译该书付出辛勤劳动的有关师生表示敬意。

希望该书的翻译出版对有志从事 MEMS 研发特别是 MEMS 封装技术的广大师生和科研人员有所帮助。

丁衡高

2004 年 5 月

## 译者序

2002年6月我在Orlando参加第一届IEEE国际传感器会议(IEEE International Conference on Sensors)期间,在书店看见2001年McGraw-Hill出版社出版的*Fundamentals of Microsystems Packaging*一书。据我所知,这是国际上第一本微系统封装方面的书籍,而我国MEMS正在快速发展,封装是难点,也是MEMS产业化关键技术之一,因此,购买此书的同时就决定组织翻译,让国内从事MEMS的科技人员及研究生作为参考书。感谢McGraw-Hill出版公司将简体中文版授权东南大学出版社,使更多的中国读者可以参考、阅读该书。

自MEMS技术出现后,一直倡导、关心和支持我国MEMS发展的丁衡高院士在百忙中为本书中文版作序,并对翻译工作给予鼓励,在此表示感谢。

本书作者Tummala教授是佐治亚理工学院微系统封装研究中心的主任,他过去长期在IBM从事封装研究工作,并首先将低温共烧陶瓷(LTCC)、多芯片技术等用于工业规模生产。他是国际微系统封装技术领域的著名学者,本书是他组织50位国际工业界和学术界人士所写。我们将本书译成中文出版是希望有助于我国微系统封装技术发展。

本书翻译由从事MEMS封装与可靠性研究的唐洁影教授和我负责组织,东南大学MEMS教育部重点实验室相关的研究生参加,具体翻译分工如下:黄庆安(序言、目录、附录、术语表、第1章)、唐洁影(第12、18、21章)、周闵新(第2、3、14章)、宋竞(第7、8、9、10章)、高冬晖(第15、16、17章)、方绪文(第5、20、22章)、范小燕(第4、13章)、许高斌(第6章)、黎仁刚(第11章)、王彦丰(第19章)。唐洁影教授对大部分章节进行了审校,全书由我统稿。在全体译者通力合作下,该书顺利完成,感谢参加翻译工作的研究生。同时,本书翻译过程中还得到许多其他同志的帮助,在此一并表示真挚的谢意。

在翻译过程中,我们对书中专用名词、术语及相关问题进行定期讨论与商榷,但由于翻译水平有限,加之时间紧迫,书中肯定会有这样或那样的错译、误译或不恰当之处,恳请读者批评指正。

黄庆安

2004年5月

## 原 书 序

微系统封装占有 1 250 亿美元的市场,从业人数 100 多万。如果将终端产品中所有微系统器件都包括进去,那么市场会更大,占 3 000 亿美元。然而,现在还不认为微系统封装是一门学科。在大学里,微电子或超大规模集成(VLSI)这种典型的学科已经有许多课程、教学大纲、基础教科书、软件和可用的设备,而这些对微系统封装来说都不存在。但是,从事微系统封装课题研究并开设一二门封装课程的高校正快速增加。据估计,美国、欧洲和远东国家已开设封装课程高校的数量从 10 年前的不足 10 所增长到现在的 50 所左右。

《微系统封装基础》是第一本为满足这种新技术发展而写的基础教科书,它适用于本科生和研究生。自从我首次编写《微电子封装基础》一书以来,已经出版了许多封装方面的书籍。这些书籍综述了一种或多种封装技术,因此大部分都可用作本书的参考书。然而,微系统封装不是一门面窄的学科,它覆盖了集成电路封装、系统电路板封装、基板装配及其之间的融合。而且,微系统封装涉及了电气设计、热形变设计、散热、材料及其加工工艺、可靠性等等。十几年前在我写第一本微电子封装书时,情况亦是这样。但今天的微系统要比微电子复杂。

本书所定义微系统包括微电子、光子、RF 和微机电系统(MEMS)。所有这些器件在成为系统之前都需要封装。而系统则提供诸如数字、光、RF、模拟及 MEMS 这样的功能。这正是本书所要论述的确切内容。本书旨在从基础层面上阐述这些技术——即每种技术的定义、每种关键概念的论述以及对主要术语的系统介绍。书中每一章都包括了基本方程、练习题和未来的发展趋势。

本书有 50 位作者参与编写,我要感谢来自国际工业界和学术界的这 50 位作者。这也许是第一本有这么多人参与写作的书,但我希望这本书读起来像是一个人写的书。我要感谢 PRC(封装研究中心)的工作人员,尤其要感谢自始至终参与组织编写本书的 Nancy Trent、PRC 的 Angie Hughes 和印度科学院的 Mahesh Varadarajan。他们花费了大量时间协调世界上的这 50 位作者。

我要感谢 McGraw-Hill 出版社执行编辑 Steve Chapman,满足了我出书的每一个要求,包括本书的两色印刷,使本书低成本地从“圆片”到“系统”,以及其他方面给予的帮助。感谢我的妻子 Anne 在我写书期间所给予的耐心和全力支持。

最后要感谢 NSF(国家科学基金会)同意把国家 ERC 给予佐治亚理工学院并使我们感到写作本书的必要。

Rao R. Tummala 教授  
佐治亚理工学院,亚特兰大

我很高兴将本书

献给我的父母：

作为你们惟一的孩子，给予我毕生的教诲、爱和支持，教导我家庭的意义。

献给我的家庭 (Anne, Dinesh, Vijay, Suneel)：

你们是我每天工作的所爱、自豪和快乐。

献给我的老师：

你们教导我如何学习以及教育的价值。

献给我的学生：

你们教会我怎样授课。

献给 IBM：

你给予我无尽的成长机会并使我成为 IBM 会士。

献给佐治亚理工学院：

你让我追求了成为新一代科学家的梦想。

献给封装研究中心：

你实现了我 SOP(封装上的系统)的梦想并教育世界如何使用 SOP。

献给 NSF：

你让我追求了 SOP 的梦想。

献给我的同事：

你们接受了我，你们使用本书和你们的工作使封装成为一门学科。

•

---

#### 作者简介

Rao R. Tummala 是佐治亚理工学院封装研究中心的教授和创立者。他加入佐治亚理工学院以前，一直在 IBM 从事封装研究工作，首先将低温共烧陶瓷 (LTCC) 和多芯片组件等技术用于工业生产，并成为 IBM Fellow。

Tummala 教授发表学术论文 270 余篇，拥有 68 项美国发明专利，并于 1988 年在国际上首次编著了《微电子封装手册》一书。他是电气电子工程师协会的会士 (Fellow, IEEE)、美国陶瓷学会会士 (Fellow, ACS)、IEEE 元件封装和制造技术 (CPMT) 协会主席和美国工程院院士。

## 单位换算表

|        |                                                                                                                                                                     |
|--------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 温度     | $K = ^\circ C + 273$<br>$^\circ C = 1.8(^{\circ}F - 32)$                                                                                                            |
| 长度     | $1\text{ m} = 10^{10}\text{ \AA} = 3.28\text{ ft.} = 39.4\text{ in.}$<br>$1\text{ mil} = 2.54 \times 10^{-5}\text{ m}$                                              |
| 质量     | $1\text{ kg} = 2.2\text{ lbm}$<br>$1\text{ 盎司} = 28.349\text{ 5 g}$                                                                                                 |
| 力      | $1\text{ N} = 1\text{ kg} \cdot \text{m/s}^2 = 0.225\text{ Lbf}$                                                                                                    |
| 压力(应力) | $1\text{ Pa} = 1\text{ N/m}^2 = 1.45 \times 10^{-4}\text{ psi}$<br>$1\text{ Torr} = 133.322\text{ Pa}$                                                              |
| 能量     | $1\text{ J} = 1\text{ W} \cdot \text{s} = 1\text{ N} \cdot \text{m} = 1\text{ V} \cdot \text{C}$<br>$1\text{ J} = 0.239\text{ cal} = 6.24 \times 10^{18}\text{ eV}$ |
| 电流     | $1\text{ A} = 1\text{ C/s} = 1\text{ V}/\Omega$                                                                                                                     |

## 常数

|             |                                                |
|-------------|------------------------------------------------|
| 阿伏伽德罗常数     | $6.02 \times 10^{23}\text{ mol}^{-1}$          |
| 气体常数, $R$   | $8.314\text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$   |
| 玻尔兹曼常数, $k$ | $8.62 \times 10^{-5}\text{ eV/K}$              |
| 普朗克常数, $h$  | $6.63 \times 10^{-33}\text{ J} \cdot \text{s}$ |
| 真空中光速, $c$  | $3 \times 10^8\text{ m/s}$                     |
| 电子电荷, $q$   | $1.6 \times 10^{-19}\text{ C}$                 |

## 单位词头

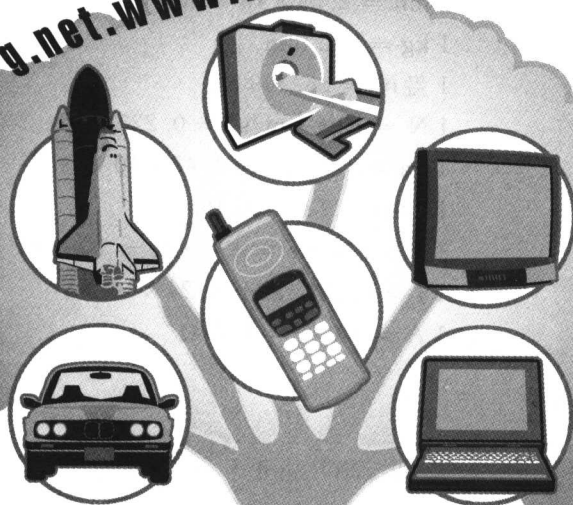
|          |           |
|----------|-----------|
| 吉, G     | $10^9$    |
| 兆, M     | $10^6$    |
| 千, k     | $10^3$    |
| 厘, c     | $10^{-2}$ |
| 毫, m     | $10^{-3}$ |
| 微, $\mu$ | $10^{-6}$ |
| 纳, n     | $10^{-9}$ |

---

注: 为保留原书的原始数据, 书中使用的非法定计量单位可按单位换算表换算。此换算表未涉及的非法定计量单位, 请参见本页提供的换算公式。



[www.html.com.edu.org.net](http://www.html.com.edu.org.net) <http://ftp.html.com.edu.org.net>



应用

软件 服务

磁光存储

电池

显示

光纤光学

微系统封装

微电子

光子

RF/ 无线

**MEMS**

# 目 录

|                     |    |
|---------------------|----|
| <b>1 微系统封装导论</b>    | 1  |
| 1.1 微系统概述           | 3  |
| 1.2 微系统技术           | 5  |
| 1.3 微系统封装(MSP)概述    | 11 |
| 1.4 微系统封装的重要性       | 19 |
| 1.5 系统级微系统技术        | 19 |
| 1.6 对微系统工程师的期望      | 22 |
| 1.7 总结及发展趋势         | 23 |
| 1.8 微系统及封装技术发展史     | 24 |
| 1.9 练习题             | 39 |
| 1.10 参考文献           | 40 |
| <b>2 封装在微电子中的作用</b> | 42 |
| 2.1 微电子概述           | 44 |
| 2.2 半导体的特性          | 45 |
| 2.3 微电子器件           | 50 |
| 2.4 集成电路(IC)        | 56 |
| 2.5 IC 封装           | 62 |
| 2.6 半导体技术发展路线图      | 64 |
| 2.7 IC 封装的挑战        | 69 |
| 2.8 总结及发展趋势         | 69 |
| 2.9 练习题             | 73 |
| 2.10 参考文献           | 74 |
| <b>3 封装在微系统中的作用</b> | 76 |
| 3.1 电子产品概述          | 78 |
| 3.2 微系统剖析           | 78 |
| 3.3 计算机与因特网         | 80 |
| 3.4 封装在计算机工业中的作用    | 84 |
| 3.5 封装在电信工业中的作用     | 91 |

|          |                          |            |
|----------|--------------------------|------------|
| 3.6      | 封装在汽车系统中的作用 .....        | 97         |
| 3.7      | 封装在医疗电子中的作用 .....        | 104        |
| 3.8      | 封装在消费类电子产品中的作用 .....     | 106        |
| 3.9      | 封装在 MEMS 产品中的作用 .....    | 108        |
| 3.10     | 总结及发展趋势 .....            | 111        |
| 3.11     | 练习题 .....                | 112        |
| 3.12     | 参考文献 .....               | 114        |
| <b>4</b> | <b>电气性能的封装设计基础 .....</b> | <b>115</b> |
| 4.1      | 封装的电气设计概述 .....          | 117        |
| 4.2      | 电气性能的封装设计基础 .....        | 119        |
| 4.3      | 系统封装的电气性能分析 .....        | 124        |
| 4.4      | 信号分配 .....               | 125        |
| 4.5      | 功率分配 .....               | 149        |
| 4.6      | 电磁干扰 .....               | 162        |
| 4.7      | 设计流程 .....               | 167        |
| 4.8      | 总结及发展趋势 .....            | 168        |
| 4.9      | 练习题 .....                | 170        |
| 4.10     | 参考文献 .....               | 172        |
| <b>5</b> | <b>可靠性设计基础 .....</b>     | <b>173</b> |
| 5.1      | 可靠性设计概述 .....            | 175        |
| 5.2      | 微系统失效及其失效机理 .....        | 175        |
| 5.3      | 可靠性设计基础 .....            | 176        |
| 5.4      | 热形变失效 .....              | 176        |
| 5.5      | 电致失效 .....               | 189        |
| 5.6      | 化学引起的失效 .....            | 192        |
| 5.7      | 总结及发展趋势 .....            | 194        |
| 5.8      | 练习题 .....                | 194        |
| 5.9      | 参考文献 .....               | 195        |
| <b>6</b> | <b>热控制基础 .....</b>       | <b>197</b> |
| 6.1      | 热控制概述 .....              | 199        |
| 6.2      | 热控制的重要性 .....            | 199        |
| 6.3      | 微系统的冷却要求 .....           | 202        |

|          |                   |            |
|----------|-------------------|------------|
| 6.4      | 热控制基础             | 205        |
| 6.5      | IC 和 PWB 封装的热控制基础 | 222        |
| 6.6      | 电冷却方法             | 228        |
| 6.7      | 总结及发展趋势           | 241        |
| 6.8      | 练习题               | 241        |
| 6.9      | 参考文献              | 242        |
| <b>7</b> | <b>单芯片封装基础</b>    | <b>244</b> |
| 7.1      | 单芯片封装概述           | 246        |
| 7.2      | 单芯片封装功能           | 247        |
| 7.3      | 单芯片封装类型           | 248        |
| 7.4      | 单芯片封装基础           | 251        |
| 7.5      | 材料、工艺和特性          | 263        |
| 7.6      | 单芯片封装的特性          | 266        |
| 7.7      | 总结及发展趋势           | 269        |
| 7.8      | 练习题               | 271        |
| 7.9      | 参考文献              | 272        |
| <b>8</b> | <b>多芯片封装基础</b>    | <b>274</b> |
| 8.1      | 多芯片组件概述           | 276        |
| 8.2      | 多芯片组件功能           | 277        |
| 8.3      | 多芯片组件的优点          | 278        |
| 8.4      | 系统级的多芯片组件         | 285        |
| 8.5      | 多芯片组件基板的类型        | 292        |
| 8.6      | 多芯片组件设计           | 304        |
| 8.7      | 多芯片组件技术比较         | 308        |
| 8.8      | 替换多芯片组件的其他方法      | 311        |
| 8.9      | 总结及发展趋势           | 311        |
| 8.10     | 练习题               | 313        |
| 8.11     | 参考文献              | 314        |
| <b>9</b> | <b>IC 组装基础</b>    | <b>316</b> |
| 9.1      | IC 组装概述           | 318        |
| 9.2      | IC 组装目的           | 319        |
| 9.3      | IC 组装的要求          | 319        |

|           |                              |            |
|-----------|------------------------------|------------|
| 9.4       | IC 组装技术 .....                | 320        |
| 9.5       | 引线键合 .....                   | 320        |
| 9.6       | 载带自动焊 .....                  | 326        |
| 9.7       | 倒装芯片 .....                   | 333        |
| 9.8       | 总结及发展趋势 .....                | 361        |
| 9.9       | 练习题 .....                    | 362        |
| 9.10      | 参考文献 .....                   | 368        |
| <b>10</b> | <b>圆片级封装基础 .....</b>         | <b>370</b> |
| 10.1      | 圆片级封装概述 .....                | 372        |
| 10.2      | 圆片级封装的重要性 .....              | 373        |
| 10.3      | WLP 技术 .....                 | 377        |
| 10.4      | WLP 可靠性 .....                | 383        |
| 10.5      | 圆片级老化和测试 .....               | 387        |
| 10.6      | 总结及发展趋势 .....                | 387        |
| 10.7      | 练习题 .....                    | 388        |
| 10.8      | 参考文献 .....                   | 389        |
| <b>11</b> | <b>分立、集成和嵌入的无源元件基础 .....</b> | <b>390</b> |
| 11.1      | 无源元件概述 .....                 | 392        |
| 11.2      | 电子产品中无源元件的功能 .....           | 392        |
| 11.3      | 无源元件基础 .....                 | 396        |
| 11.4      | 无源元件的表示方式 .....              | 405        |
| 11.5      | 分立无源元件 .....                 | 408        |
| 11.6      | 集成无源元件 .....                 | 418        |
| 11.7      | 嵌入无源元件 .....                 | 420        |
| 11.8      | 总结及发展趋势 .....                | 428        |
| 11.9      | 练习题 .....                    | 429        |
| 11.10     | 参考文献 .....                   | 430        |
| <b>12</b> | <b>光电子基础 .....</b>           | <b>431</b> |
| 12.1      | 光电子概述 .....                  | 433        |
| 12.2      | 光电子的重要性 .....                | 433        |
| 12.3      | 光电子的市场 .....                 | 435        |
| 12.4      | 光电子系统分析 .....                | 435        |

|           |                      |            |
|-----------|----------------------|------------|
| 12.5      | 光电子基础                | 436        |
| 12.6      | 光互连系统结构              | 452        |
| 12.7      | 总结及发展趋势              | 456        |
| 12.8      | 练习题                  | 458        |
| 12.9      | 参考文献                 | 460        |
| <b>13</b> | <b>射频(RF)封装基础</b>    | <b>462</b> |
| 13.1      | RF 概述                | 464        |
| 13.2      | RF 应用与市场             | 465        |
| 13.3      | RF 系统分析              | 466        |
| 13.4      | RF 基础                | 474        |
| 13.5      | RF 封装                | 492        |
| 13.6      | RF 测量技术              | 495        |
| 13.7      | 总结及发展趋势              | 496        |
| 13.8      | 练习题                  | 497        |
| 13.9      | 参考文献                 | 498        |
| <b>14</b> | <b>微机电系统(MEMS)基础</b> | <b>500</b> |
| 14.1      | MEMS 概述              | 502        |
| 14.2      | MEMS 应用领域            | 503        |
| 14.3      | MEMS 器件基础            | 505        |
| 14.4      | MEMS 封装方法            | 517        |
| 14.5      | 典型 MEMS 器件           | 518        |
| 14.6      | MEMS 的主要失效机理         | 522        |
| 14.7      | MEMS 惯性传感器:实例分析      | 523        |
| 14.8      | 总结及发展趋势              | 532        |
| 14.9      | 练习题                  | 533        |
| 14.10     | 参考文献                 | 535        |
| <b>15</b> | <b>密封与包封基础</b>       | <b>536</b> |
| 15.1      | 包封和密封概述              | 538        |
| 15.2      | 包封的必要性               | 538        |
| 15.3      | 包封与密封基础              | 540        |
| 15.4      | 包封要求                 | 544        |
| 15.5      | 包封材料                 | 548        |

|           |                   |            |
|-----------|-------------------|------------|
| 15.6      | 包封工艺              | 553        |
| 15.7      | 气密封接              | 557        |
| 15.8      | 总结及发展趋势           | 561        |
| 15.9      | 练习题               | 561        |
| 15.10     | 参考文献              | 562        |
| <b>16</b> | <b>系统级印刷电路板基础</b> | <b>565</b> |
| 16.1      | 系统级印刷电路板概述        | 567        |
| 16.2      | PWB 类型            | 568        |
| 16.3      | PWB 分析            | 569        |
| 16.4      | PWB 基础            | 570        |
| 16.5      | PWB 设计的 CAD 工具    | 574        |
| 16.6      | PWB 材料            | 579        |
| 16.7      | 标准 PWB 制作         | 586        |
| 16.8      | 标准 PWB 的局限性       | 593        |
| 16.9      | 微通孔电路板            | 599        |
| 16.10     | PWB 市场            | 601        |
| 16.11     | 总结及发展趋势           | 602        |
| 16.12     | 练习题               | 603        |
| 16.13     | 参考文献              | 604        |
| <b>17</b> | <b>电路板组装基础</b>    | <b>606</b> |
| 17.1      | PWB 组装概述          | 608        |
| 17.2      | 表面安装技术            | 608        |
| 17.3      | 通孔插装              | 628        |
| 17.4      | 常见的组装问题           | 632        |
| 17.5      | 过程控制              | 635        |
| 17.6      | 设计挑战              | 635        |
| 17.7      | 总结及发展趋势           | 636        |
| 17.8      | 练习题               | 637        |
| 17.9      | 参考文献              | 637        |
| <b>18</b> | <b>封装材料与工艺基础</b>  | <b>638</b> |
| 18.1      | 材料在微系统封装中的作用      | 640        |
| 18.2      | 封装材料及其特性          | 643        |

|           |                   |     |
|-----------|-------------------|-----|
| 18.3      | 材料工艺              | 658 |
| 18.4      | 总结及发展趋势           | 674 |
| 18.5      | 练习题               | 683 |
| 18.6      | 参考文献              | 685 |
| <b>19</b> | <b>电气性能测试基础</b>   | 687 |
| 19.1      | 电气测试概述            | 689 |
| 19.2      | 电气测试的必要性          | 689 |
| 19.3      | 系统级电气测试的分析        | 689 |
| 19.4      | 电气测试基础            | 691 |
| 19.5      | 互连测试              | 697 |
| 19.6      | 有源电路测试            | 703 |
| 19.7      | 可测性设计             | 706 |
| 19.8      | 总结及发展趋势           | 711 |
| 19.9      | 练习题               | 714 |
| 19.10     | 参考文献              | 715 |
| <b>20</b> | <b>封装制造基础</b>     | 716 |
| 20.1      | 制造概述              | 718 |
| 20.2      | 制造目的              | 718 |
| 20.3      | 制造基础              | 718 |
| 20.4      | 统计基础              | 721 |
| 20.5      | 过程控制              | 736 |
| 20.6      | 统计实验设计            | 747 |
| 20.7      | 工艺模型              | 756 |
| 20.8      | 成品率模型             | 762 |
| 20.9      | CIM 系统            | 769 |
| 20.10     | 总结及发展趋势           | 770 |
| 20.11     | 练习题               | 770 |
| 20.12     | 参考文献              | 773 |
| <b>21</b> | <b>微系统的环境设计基础</b> | 775 |
| 21.1      | 微系统的环境危害概述        | 777 |
| 21.2      | 电子生产对环境的影响        | 781 |
| 21.3      | 寿命周期的评价           | 795 |



|           |                      |            |
|-----------|----------------------|------------|
| 21.4      | 总结及发展趋势·····         | 800        |
| 21.5      | 练习题·····             | 801        |
| 21.6      | 参考文献·····            | 802        |
| <b>22</b> | <b>微系统可靠性概述·····</b> | <b>804</b> |
| 22.1      | 热形变可靠性概述·····        | 806        |
| 22.2      | 热形变可靠性基础·····        | 806        |
| 22.3      | 可靠性的重要性·····         | 809        |
| 22.4      | 可靠性计量学·····          | 811        |
| 22.5      | 失效模式及其机理·····        | 815        |
| 22.6      | 可靠性认证·····           | 820        |
| 22.7      | 热形变失效分析·····         | 821        |
| 22.8      | 可靠性分析的实验方法与工具·····   | 826        |
| 22.9      | 可靠性的综合预测方法·····      | 839        |
| 22.10     | 总结及发展趋势·····         | 842        |
| 22.11     | 练习题·····             | 842        |
| 22.12     | 参考文献·····            | 844        |
|           | <b>术语汇总表·····</b>    | <b>845</b> |
|           | <b>附录·····</b>       | <b>879</b> |