

Series of Electronic Packaging Technology
电子封装技术丛书

Introduction to SYSTEM-ON-PACKAGE(SOP) Miniaturization of the Entire System

系统级封装导论 ——整体系统微型化

【美】拉奥 R. 图马拉 马达范·斯瓦米纳坦 著
(Rao R. Tummala) (Madhavan Swaminathan)

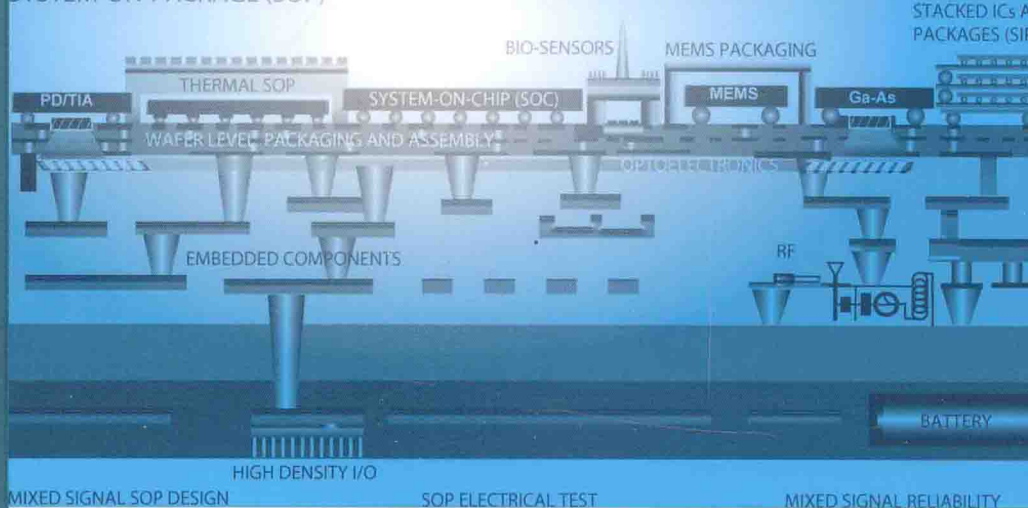
著 

中国电子学会电子制造与封装技术分会
《电子封装技术丛书》编辑委员会

组织翻译



SYSTEM-ON-PACKAGE (SOP)



MIXED SIGNAL SOP DESIGN

SOP ELECTRICAL TEST

MIXED SIGNAL RELIABILITY



化学工业出版社




电子封装技术丛书

Series of Electronic Packaging Technology

Introduction to SYSTEM-ON-PACKAGE(SOP) Miniaturization of the Entire System

系统级封装导论 ——整体系统微型化

【美】拉奥 R. 图马拉 马达范·斯瓦米纳坦 著 
(Rao R. Tummala) (Madhavan Swaminathan)

中国电子学会电子制造与封装技术分会 组织翻译 
《电子封装技术丛书》编辑委员会

刘胜 等译 



化学工业出版社

· 北京 ·

本书是关于电子封装中系统级封装 (System-on-Package, SOP) 的一本专业性著作。本书由电子封装领域权威专家——美国工程院资深院士 Rao R. Tummala 教授和 Madhavan Swaminathan 教授编著, 由多位长期从事微纳制造、电子封装理论和技术研究的知名学者以及专家编写而成。本书从系统级封装基本思想和概念讲起, 陆续通过 13 个章节分别介绍了片上系统封装技术, 芯片堆叠技术, 射频、光电子、混合信号的集成系统封装技术, 多层布线和薄膜元件系统封装技术, MEMS 封装及晶圆级系统级封装技术等, 还介绍了系统级封装后续的热管理问题、相关测试方法的研究状况, 并在最后介绍了系统级封装技术在生物传感器方面的应用情况。

本书无论是对高校高年级本科生, 从事电子封装技术研究的研究生, 还是从事相关研究工作的专业技术及研究人员都有较大帮助。

图书在版编目 (CIP) 数据

系统级封装导论——整体系统微型化/[美] 图马拉 (Tummala, R. R.), 斯瓦米纳坦 (Swaminathan, M.) 著; 中国电子学会电子制造与封装技术分会组织翻译, 刘胜等译. —北京: 化学工业出版社, 2014. 2

书名原文: Introduction to System-on-Package (SOP): Miniaturization of the Entire System
ISBN 978-7-122-19406-0

I. ①系… II. ①图…②斯…③中…④刘… III. ①电子器件-封装工艺 IV. ①TN702.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 001119 号

Introduction to System-on-Package (SOP): Miniaturization of the Entire System/By Rao R. Tummala, Madhavan Swaminathan
ISBN 9780071459068

Copyright ©2008 by McGraw-Hill Education.

All Rights reserved. No part of this publication may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording, taping, or any database, information or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

This authorized Chinese translation is jointly published by McGraw-Hill Education (Asia) and Chemical Industry Press. This edition is authorized for sale in the People's Republic of China only, excluding Hong Kong, Macao SAR and Taiwan.

Copyright © 2014 by McGraw-Hill Education (Asia), a division of McGraw-Hill Education (Singapore) Pte. Ltd. and Chemical Industry Press.

版权所有。未经出版人事先书面许可, 对本出版物的任何部分不得以任何方式或途径复制或传播, 包括但不限于复印、录制、录音, 或通过任何数据库、信息或可检索的系统。

本授权中文简体字翻译版由麦格劳-希尔 (亚洲) 教育出版公司和化学工业出版社合作出版。此版本经授权仅限在中华人民共和国境内 (不包括香港特别行政区、澳门特别行政区和台湾) 销售。

版权 © 2014 由麦格劳-希尔 (亚洲) 教育出版公司与化学工业出版社所有。

本书封面贴有 McGraw-Hill Education 公司防伪标签, 无标签者不得销售。

北京市版权局著作权合同登记号: 01-2009-0715

责任编辑: 吴刚

责任校对: 陶燕华

文字编辑: 闫敏

装帧设计: 韩飞

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印刷: 北京市振南印刷有限责任公司

装订: 三河市宇新装订厂

710mm×1000mm 1/16 印张 36 字数 782 千字 2014 年 7 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 198.00 元

版权所有 违者必究

《电子封装技术丛书》编辑委员会

顾 问 俞忠钰 王阳元 邹世昌 杨玉良 许居衍
余寿文 龚 克 段宝岩 王 曦 汪 敏
徐晓兰

主 任 毕克允

副主任 汤小川 刘 胜 张蜀平 武 祥

编 委 (以姓氏笔画为序)

丁冬雁	万里兮	马莒生	王 红	王春青
王新潮	孔令文	石 磊	石明达	田艳红
史训清	冯小龙	毕克允	朱文辉	朱颂春
任爱光	刘 胜	刘兴军	李 明	李可为
李维平	汤小川	杨士勇	杨崇峰	杨银堂
杨道国	肖 斐	肖胜利	张 弓	张 宏
张小建	张国旗	张建华	张蜀平	陈长生
武 祥	尚金堂	罗 乐	罗小兵	郑宏宇
郑学军	郑晓光	赵 宁	赵元富	贵大勇
禹胜林	柴广跃	柴志强	恩云飞	徐忠华
郭永兴	陶建中	曹立强	韩江龙	程 凯
赖志明	蔡 坚	樊学军		

译序

半导体产业是国民经济和社会发展的战略性、基础性产业，是电子信息产业的核心与基础，是各国抢占经济制高点、提升综合国力的重要领域，国际上一些国家把它誉为保障国家安全的产业，所以它是一个衡量国家经济科技发展和国家实力的重要标准。继 1947 年发明了晶体管、1958 年发明集成电路之后，半导体产业一直保持着旺盛的生命力。IC 沿着“摩尔定律”的规律发展，已经实现线宽 22nm，正向 11nm 迈进，开始进入后摩尔时代，即延伸摩尔定律：微型化、多样化、低成本、超越 CMOS（互补金属氧化物半导体）器件。

系统级封装（SOP）是摩尔定律以外的多样化发展的结果，它是与片上系统（SOC）并行发展起来的一种新技术。片上系统是指将系统功能进行单片集成的电路芯片，该芯片加以封装就形成一个系统的器件。系统级封装是指将多个半导体裸芯片和可能的无源元件构成的高性能系统集成于一个封装内，形成一个功能性器件，因此可以实现较高的性能密度，集成较多的无源元件，最有效地使用芯片组合，缩短交货周期。SOP 封装还可大大减少开发时间和节约成本，具有广阔的应用前景，因此人们对其寄予厚望，并将其视为 3D 封装的核心技术。SOP 将成为半导体产业创新的重要方向。

为了适应我国电子封装业的发展，满足广大电子封装领域的企业、科研院所工作者对电子封装方面书籍的迫切需求，中国电子学会电子制造与封装技术分会成立了《电子封装技术丛书》编辑委员会，组织系列丛书的编辑、出版工作。

近几年来，丛书编辑委员会已先后组织编写、翻译出版了《集成电路封装试验手册》（1998 年电子工业出版社出版），《微电子封装手册》（2001 年电子工业出版社出版），《微电子封装技术》（2003 年中国科学技术大学出版社出版），《电子封装材料与工艺》（2006 年化学工业出版社出版），《MEMS/MOEMS 封装技术》（2008 年化学工业出版社出版），《电子封装工艺设备》（2012 年化学工业出版社出版），《电子封装技术与可靠性》（2012 年化学工业出版社出版）共七本图书。《系统级封装导论》一书是这一系列的第九本。该书出版后，正在编纂中的系列丛书之五《光电子封装技术》、之十《三维电子封装的硅通孔技术》将会陆续出版，以飨读者。

《系统级封装导论》译自美国 Rao R. Tummala（拉奥 R. 图马拉），Madhavan Swaminathan（马达范·斯瓦米纳坦）所著的“Introduction to System-on-Package (SOP): Miniaturization of the Entire System”。该书的内容涉及片上系统（SOC）、堆叠式 IC 和封装（SIP）、混合信号（SOP）设计、射频系统级封装（RF SOP）、集成芯片到芯片的光电子系统级封装、内嵌多层布线和薄膜元件的 SOP 基板、混合信号（SOP）可靠性、MEMS 封装、晶圆级 SOP、系统级封装（SOP）散热、系统级封装（SOP）模块及系统的电测试、生物传感器 SOP 等技术。该书对从事

电子封装业和电子信息装备业以及相关行业的科研、生产、应用工作者都会有较高的使用价值。对高等院校相关师生也有一定的参考意义。

我相信本书中译本的出版发行将对我国电子封装及电子信息装备业发展起到积极的推动作用。我也向华中科技大学参与本书译校的刘胜教授及全体师生和出版社的工作人员，表示由衷的感谢。

畢克允

译者的话

系统级封装 (System-on-Package, SOP) 是系统层次的封装概念。它是指将器件、封装、系统主板缩小到一个具备所有功能需求的单系统中的封装。这样一个包含多集成电路芯片 (ICs) 的单系统封装, 通过对数字、射频 (RF)、光学、微机电系统 (MEMS) 的协同设计和制造, 提供了所有的系统功能以及在集成电路中或者系统封装中的微传感器功能。

本书英文原版 “Introduction to System-on-Package (SOP): Miniaturization of the Entire System” 是目前电子封装领域关于系统级封装技术的一本重要著作。原作者 Rao R. Tummala 教授和 Madhavan Swaminathan 教授都长期从事微电子、微系统研究工作。尤其是 Tummala 教授, 他是美国国家工程院院士, IBM 会士, IEEE 会士, 佐治亚理工学院材料科学与工程学院讲座教授, 美国国家科学基金会工程研究中心 (ERC) 下的微系统封装研究中心 (PRC) 主任。他是电子封装领域的权威人士。本书详细收录了国际知名学者近年来在系统级封装领域的最新研究成果。

本书第 1 章首先对系统级封装技术进行了概述性介绍; 第 2 章介绍了片上系统 (SOC) 技术; 第 3 章介绍了集成电路和封装的堆叠 (SIP); 第 4~6 章分别详细介绍了混合信号、射频、集成芯片到芯片光电子的 SOP 设计及实现; 第 7 章介绍多层布线和薄膜元件的 SOP 基板; 第 8 章对混合信号 SOP 的可靠性进行了分析; 第 9、10 章介绍了 MEMS 封装以及晶圆级 SOP 的最新研究工作; 第 11 章着重讲述系统级封装热管理问题; 然后, 第 12 章对系统级封装模块和系统的电测试各种方法进行了分析; 最后, 第 13 章介绍了生物传感器系统级封装概念和应用。

本译著是在中国电子科学研究院副院长、中国电子学会常务理事、中国电子学会电子制造与封装技术分会理事长、中国半导体行业协会副理事长毕克允教授的建议和鼓励下, 由华中科技大学机械科学与工程学院微系统中心主任刘胜教授牵头, 在中心全体师生员工共同努力下, 并在非常紧凑的时间内完成的。刘胜教授的几名同事, 如能动学院的罗小兵教授等, 也提供了大量的帮助, 联合他们的研究生们加入翻译工作。本书前言部分和序由王恺主要翻译, 第 1 章由万志敏主要翻译, 第 2 章由陈浩和陈全主要翻译, 第 3 章由曹斌和蔡明先主要翻译, 第 4 章由吕植成和赵志力主要翻译, 第 5 章由曹钢主要翻译, 第 6 章由赵爽和王佳鑫主要翻译, 第 7 章由吴步龙、杨亮和焦峰主要翻译, 第 8 章由陈星和张芹主要翻译, 第 9 章由刘超军和王宇哲主要翻译, 第 10 章由刘孝刚和刘川主要翻译, 第 11 章由毛章明和陈全主要翻译, 第 12 章由宋劭和申智辉主要翻译, 第 13 章由高鸣源主要翻译, 缩略语部分由胡程志主要翻译。刘胜教授承担全书统稿、审译工作和部分较难章节的翻译工作。另外, 刘孝刚参与前言、第 1~3 章、第 11 章审校工作, 以及后期全书的修改

工作，闻铭参与第4、5、13章审校工作，李水明参与第6章审校工作，李操参与第7章审校工作，陈星参与第8章审校工作，曹钢参与第9章审校工作，师帅参与第10章审校工作，杨元文以及北京信息工程大学缪敏教授参与第12章审校工作。对大家一并表示感谢。

同时，也要感谢华中科技大学数字制造装备与技术国家重点实验室对本书的翻译工作给予的大力支持。

需要指出的是，本书的内容仅代表原作者个人的观点和见解，并不代表译者的观点。尤其是书中关于 SOP 以及 SIP (System-in-Package) 的概念问题完全遵从英文原文，本书译者不参与对这两个概念的争论。

另外，由于本书内容较多且新，许多术语以及图片尽量维持并体现原义；对原书中的一些印刷错误或明显单词拼写等错误，以及其他需要商榷的地方，以“译者注”表明。同时，由于译者的理解问题以及系统封装内容跨度大等原因，本书难免有错译、误译以及不妥之处，恳请广大读者给予原谅并指正。

译者

英文版序

1994年，我很荣幸地作为佐治亚理工的新任校长受邀参加了我校第一个国家自然科学基金（NSF）优秀中心——微系统封装研究中心的开幕式。该中心由拉奥 R. 图马拉（Rao R. Tummala）教授领导，旨在采用创新的方法将众多芯片封装成超级微型化的单一组件系统，以实现多种功效。通过中心的赞助，我校不同领域的专家与来自全国乃至全世界的其他大学或者工业界中有想法的专家们走在一起，组建了一个强大的团队，共同努力扩大单个影响力。这对于佐治亚理工来说是第一次。这是一个大胆的尝试，不仅需要最好的技术理念，而且还需要有一个新方法用于系统试验平台研究，牵涉到教师、学生以及信息管理的高度多元化的团队。这是一个高风险、同时也是高回报的策略。

所有佐治亚理工需要的教师专家并不是一开始就可以全部到位。我相信，如此激动人心的前景，将吸引着更多有才华的人员加入我们。我们也认识到需要先进的设备，包括大量特殊用途的超净间基础设施。基于这些投入与 Tummala 教授的领导，将使佐治亚理工在基于系统级封装（System-on-Package, SOP）的超微小系统化这个重要研究领域，在众大学中处于先驱的位置。

从1995年到2007年，本书中所描写的 SOP 技术一直得到了 NSF、工业界与佐治亚理工研究联盟的支持。在该时期内，中心人员来自于佐治亚理工的电气、机械、材料科学与化学化工各个院系，且有 55 位教师和高级研究员来自全球 160 家公司。另外还有 600 名出色的博士生与硕士生参加了开拓性的 SOP 研发工作，同时他们现在正在作为工业界的领导使用他们在佐治亚理工开发出的 SOP 技术来驱动下一个时代的发展。

本书介绍的 SOP 技术将使未来 20 年中电子与生物电子系统体积缩小到目前的一千分之一，甚至一百万分之一。它介绍了系统集成定律的概念，被认为是用于整个系统微小化的电子学第二定律。它补充了众所周知的集成电路（IC）摩尔定律，摩尔定律主要应用于系统的小部分。SOP 使得最小化以及系统功能多样化成为可能，它将促使消费电子、医疗、能源与交通等领域新一代产品的诞生。

我校以及全世界的教师将会发现本书是教育后辈学生 SOP 技术的有用资源。我要向 Tummala 教授和他的团队带来了佐治亚理工第一个国家自然科学基金优秀中心表示祝贺，同时为将其带入下一个崭新的阶段而出版这本杰出著作表示祝贺。

Wayne Clough
佐治亚理工学院院长

英文版前言

与在 IC 水平定义的片上系统 (SOC) 和在模块水平定义的系统封装 (SIP) 相比较, 系统级封装 (SOP) 是一个正在兴起的系统小型化技术。SOC 主要通过缩小光刻尺度来实现微小化, 在 1980 年达到微米量级, 而今已达纳米尺度。SIP 通过减薄 IC 实现微小化。晶圆片从 $800\mu\text{m}$ 厚减薄到 $50\mu\text{m}$, 并且沿垂直方向可实现 10 层堆叠, 形成一个三维形式。这些 IC 要么通过引线互连, 要么通过倒装焊接技术互连。因此, SIP 比 SOC 更小型化。近来硅通孔 (TSV) 的发展, 代替了焊盘到焊盘直接键合的倒装焊接技术, 使得 SIP 进一步小型化。然而, SOC 与 SIP 仅仅是系统小型化中一个非常小的部分。因为, IC 的数量或者它的尺寸在一个典型的系统中只有 $10\% \sim 20\%$, 就如 IC 在手机整体中占的份额一样。所以, 对于 SOC 与堆叠 SIP 技术, 只解决了整体系统很小的部分。

这本书介绍了用于整体系统微小化的 SOP 概念。它论述了系统微小化后的优点, 与目前分立组件封装相比, 其成本更低, 具有更高电气性能与更好的热-机械可靠性。在本书中描述的 SOP 概念用于小型化系统有两个基本的驱动力: ①将 IC、封装和基板的三层结构减少到 IC 与系统封装两个层面。这是通过将 IC 封装与系统主板集成为一体来实现的; ②将现有毫米级尺寸的分立式系统组件缩小为嵌入式的微米与纳米尺度的超级薄膜组件。在 SOP 概念中, 这些薄膜系统组件将嵌入于 CMOS IC 和系统封装中。此外, 基于成本、功能与性能优化考虑, SOP 有力地说明了什么应该集成在 CMOS 中, 什么元件应该集成在系统封装中。

这本介绍 SOP 的书是基于佐治亚理工封装研究中心 (PRC) 12 年的研究工作。该中心的资助来源于国家自然科学基金 (NSF) 工程研究中心 (ERC) 项目、佐治亚州以及来自全球的 100 多个公司。一个由来自电气、机械、材料、化学工程系的 25 名教师与 500 名研究生组成的跨学科团队参与了这项研究。

本书是第一本同时满足工业界与学术界需求的基础性与技术性图书。它尝试定义、对比和区分三种主要的电子系统技术 (即 SOC、SIP 与 SOP) 在小型化、成本、电气性能与可靠性等方面的影响。通过 13 章内容来介绍 SOP 技术的全部体系, 第 1 章定义了 SOP 技术, 在接下来的两章将它与 SOC 与 SIP 进行比较与区分。然后, 本书从 SOP 设计到系统封装上数字、RF 与光学功能的集成方面系统地描述了每种 SOP 技术。接下来的几章通过采用的一系列的互连技术描述了 SOP 材料与工艺过程制作技术、装配、测试与可靠性问题。最后一章的内容关于生物传感器 SOP, 介绍了不同生物医学中 SOP 概念的独特应用。

我们感谢 NSF、ERC、佐治亚理工学院以及佐治亚研究联盟在资金上的支持, 感谢 40 个科研机构研究人员以及工业界同行在本书描述到的相关技术中所作的贡献。我们感激 PRC 员工, 尤其是 Reed Crouch, 他从始至终都在协调本书的进

展。我们为 Aparna Shukla 专业的编辑工作表示感谢，还有麦格劳-希尔 (McGraw-Hill) 的出版商 Steve Chapman，他保证了这本书的高质量出版。我们也为我们的妻子 Anne 与 Shailaja 在整本书的写作过程中表现出来的耐心与全力支持表示感谢。

Rao R. Tummala 教授

Madhavan Swaminathan 教授

于佐治亚州亚特兰大市佐治亚理工学院

目 录

第 1 章 系统级封装技术介绍	1
1.1 引言	2
1.2 电子系统数据集成趋势	3
1.3 电子系统组成部分	4
1.4 系统技术演变	5
1.5 5 个主要的系统技术	7
1.5.1 分立式器件的 SOB 技术	8
1.5.2 在单芯片上实现两个或多系统功能的 SOC 技术	9
1.5.3 多芯片模块 (MCM): 两个或多个芯片水平互连封装集成	9
1.5.4 堆叠式 IC 和封装 (SIP): 两个或多个芯片堆叠封装集成 (3D Moore 定律)	10
1.6 系统级封装技术 (最好的 IC 和系统集成模块)	13
1.6.1 概述	13
1.6.2 微型化趋势	16
1.7 5 个系统技术的比较	17
1.8 SOP 全球发展状况	19
1.8.1 光学 SOP	19
1.8.2 射频 SOP	21
1.8.3 嵌入式无源 SOP	21
1.8.4 MEMS SOP	21
1.9 SOP 技术实施	22
1.10 SOP 技术	24
1.11 总结	25
参考文献	26
第 2 章 片上系统 (SOC) 简介	29
2.1 引言	30
2.2 关键客户需求	31
2.3 SOC 架构	33
2.4 SOC 设计挑战	37
2.4.1 SOC 设计阶段 1——SOC 定义与挑战	38
2.4.2 SOC 设计阶段 2——SOC 创建过程与挑战	42
2.5 总结	57

参考文献	57
第 3 章 堆叠式 IC 和封装 (SIP)	59
3.1 SIP 定义	60
3.1.1 定义	60
3.1.2 应用	60
3.1.3 SIP 的主要发展图和分类	61
3.2 SIP 面临的挑战	63
3.2.1 材料和工艺流程问题	64
3.2.2 机械问题	64
3.2.3 电学问题	65
3.2.4 热学问题	66
3.3 非 TSV SIP 技术	69
3.3.1 非 TSV SIP 的历史变革	69
3.3.2 芯片堆叠	71
3.3.3 封装堆叠	83
3.3.4 芯片堆叠与封装堆叠	87
3.4 TSV SIP 技术	88
3.4.1 引言	88
3.4.2 三维 TSV 技术的历史演变	91
3.4.3 基本的 TSV 技术	92
3.4.4 采用 TSV 的各种三维集成技术	98
3.4.5 硅载片技术	104
3.5 未来趋势	105
参考文献	106
第 4 章 混合信号 (SOP) 设计	111
4.1 引言	112
4.1.1 混合信号器件与系统	113
4.1.2 移动应用集成的重要性	114
4.1.3 混合信号系统架构	116
4.1.4 混合信号设计的挑战	116
4.1.5 制造技术	119
4.2 用于 RF 前端的嵌入式无源器件设计	119
4.2.1 嵌入式电感	120
4.2.2 嵌入式电容	123
4.2.3 嵌入式滤波器	124
4.2.4 嵌入式平衡-非平衡转换器	127
4.2.5 滤波器-Balun 网络	129
4.2.6 可调谐滤波器	131

4.3	芯片-封装协同设计	133
4.3.1	低噪声放大器设计	134
4.3.2	并发振荡器设计	136
4.4	无线局域网的 RF 前端模块设计	140
4.5	设计工具	142
4.5.1	嵌入式 RF 电路尺寸设计	143
4.5.2	信号模型和电源传送网络	146
4.5.3	有理函数、网络合成与瞬态仿真	150
4.5.4	生产设计	154
4.6	耦合	158
4.6.1	模拟-模拟耦合	158
4.6.2	数字-模拟耦合	163
4.7	去耦合	166
4.7.1	数字应用中去耦的需要	168
4.7.2	贴片电容的问题	169
4.7.3	嵌入式去耦	169
4.7.4	嵌入式电容的特征	173
4.8	电磁带隙 (EBG) 结构	175
4.8.1	EBG 结构分析与设计	176
4.8.2	EBG 在抑制电源噪声方面的应用	179
4.8.3	EBG 的辐射分析	181
4.9	总结	183
	参考文献	184
第 5 章	射频系统级封装 (RF SOP)	191
5.1	引言	192
5.2	RF SOP 概念	192
5.3	RF 封装技术的历史演变	195
5.4	RF SOP 技术	196
5.4.1	建模与优化	196
5.4.2	RF 基板材料技术	198
5.4.3	天线	198
5.4.4	电感器	205
5.4.5	RF 电容器	208
5.4.6	电阻	213
5.4.7	滤波器	218
5.4.8	平衡-不平衡变换器	220
5.4.9	组合器	220
5.4.10	RF MEMS 开关	221
5.4.11	电子标签 (RFID) 技术	227

5.5	RF 模块集成	229
5.5.1	无线局域网 (WLAN)	229
5.5.2	智能网络传输器 (INC)	230
5.6	未来发展趋势	232
	参考文献	234
第 6 章	集成芯片到芯片的光电子系统级封装	240
6.1	引言	241
6.2	光电子系统级封装 (SOP) 的应用	242
6.2.1	高速数字系统与高性能计算	242
6.2.2	RF-光学通信系统	243
6.3	薄层光电子 SOP 的挑战	244
6.3.1	光学对准	244
6.3.2	薄膜光学波导材料的关键物理和光学特性	245
6.4	光电子系统级封装的优点	248
6.4.1	高速电气与光学线路的性能对比	248
6.4.2	布线密度	249
6.4.3	功率损耗	251
6.4.4	可靠性	251
6.5	光电子系统级封装 (SOP) 技术的发展	252
6.5.1	板-板光学布线	253
6.5.2	芯片-芯片光互连	254
6.6	光电子 SOP 薄膜元件	256
6.6.1	无源薄膜光波电路	256
6.6.2	有源光电子 SOP 薄膜器件	265
6.6.3	三维光波电路的良机	265
6.7	SOP 集成: 界面光学耦合	267
6.8	芯片上的光学电路	271
6.9	光电子 SOP 的未来趋势	273
6.10	总结	273
	参考文献	274
第 7 章	内嵌多层布线和薄膜元件的 SOP 基板	283
7.1	引言	284
7.2	基板集成技术的历史演变	286
7.3	SOP 基板	287
7.3.1	动力与挑战	287
7.3.2	嵌入低介电常数的电介质、芯体与导体的超薄膜布线	289
7.3.3	嵌入式无源器件	309
7.3.4	嵌入式有源器件	321

7.3.5	散热材料和结构的微型化	324
7.4	SOP 基板集成的未来	325
	参考文献	326
第 8 章	混合信号 SOP 可靠性	330
8.1	系统级可靠性注意事项	331
8.1.1	失效机制	332
8.1.2	为可靠性而设计	333
8.1.3	可靠性验证	335
8.2	多功能 SOP 基板的可靠性	335
8.2.1	材料和工艺可靠性	336
8.2.2	数字功能可靠性与验证	341
8.2.3	射频功能可靠性及验证	344
8.2.4	光学功能可靠性及验证	346
8.2.5	多功能系统稳定性	348
8.3	基板与 IC 的互连可靠性	349
8.3.1	影响基板与集成电路互连可靠性的因素	350
8.3.2	100 μm 倒装芯片组装可靠性	351
8.3.3	防止芯片开裂的可靠性研究	356
8.3.4	焊点可靠性	356
8.3.5	界面黏结和湿气对底部填料可靠性的影响	357
8.4	未来的趋势和发展方向	360
8.4.1	发展焊料	360
8.4.2	柔性互连	361
8.4.3	焊料和纳米互连之外的选择	361
8.5	总结	362
	参考文献	363
第 9 章	MEMS 封装	369
9.1	引言	370
9.2	MEMS 封装中的挑战	370
9.3	芯片级与晶圆级封装的对比	371
9.4	晶圆键合技术	372
9.4.1	直接键合	373
9.4.2	利用中间层键合	373
9.5	基于牺牲薄膜的密封技术	376
9.5.1	刻蚀牺牲层材料	376
9.5.2	牺牲层聚合物的分解	379
9.6	低损耗聚合物封装技术	382
9.7	吸气剂技术	383

9.7.1	非挥发性吸气剂	384
9.7.2	薄膜吸气剂	385
9.7.3	使用吸气剂提高 MEMS 可靠性	385
9.8	互连	387
9.9	组装	389
9.10	总结和展望	390
	参考文献	391
第 10 章	晶圆级 SOP	396
10.1	引言	397
10.1.1	定义	397
10.1.2	晶圆级封装——历史进程	398
10.2	布线形成与再分布	401
10.2.1	IC 封装间距间隙	401
10.2.2	硅上再分布层关闭间距间隙	403
10.3	晶圆级薄膜嵌入式元件	403
10.3.1	再分布层中的嵌入式薄膜元件	404
10.3.2	硅载体基板上的嵌入式薄膜元件	404
10.4	晶圆级封装和互连 (WLPI)	406
10.4.1	WLPI 的分类	409
10.4.2	WLSOP 装配	432
10.5	三维 WLSOP	435
10.6	晶圆级检测及老化	436
10.7	总结	439
	参考文献	439
第 11 章	系统级封装 (SOP) 散热	446
11.1	SOP 散热基础	447
11.1.1	SOP 热影响	448
11.1.2	基于 SOP 便携式产品的系统级热约束	449
11.2	SOP 模块内热源	450
11.2.1	数字 SOP	450
11.2.2	RF SOP	452
11.2.3	光电子 SOP	453
11.2.4	MEMS SOP	454
11.3	传热模式基础	454
11.3.1	传导	455
11.3.2	对流	458
11.3.3	辐射换热	461
11.4	热分析原理	463