

信息科学与工程系列专著

主动红外微电子封装缺陷 检测技术

Active Infrared Technology for Defect Inspection
of Microelectronics Packaging

◎ 陆向宁 著



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

信息科学与工程系列专著

主动红外微电子封装缺陷检测技术

Active Infrared Technology for Defect Inspection of
Microelectronics Packaging

陆向宁 著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

内 容 简 介

本书将主动红外无损检测技术应用于微电子封装领域,结合有限元仿真对焊球热性能及缺陷检测进行了研究和分析,提出了一种基于主动红外热成像的封装缺陷检测方法,详细讲述了热图像信号的解析方法,并结合实验检测结果,对主动红外微电子封装缺陷检测技术进行深入的阐述,为高密度微电子封装的可靠性评估提供了一种快速、有效的方法。

本书可用作高校微电子封装检测技术相关课程的本科生、研究生选修教材,也可供电子制造技术相关企业和研究人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

主动红外微电子封装缺陷检测技术 / 陆向宁著. —北京: 电子工业出版社, 2016.12
(信息科学与工程系列专著)

ISBN 978-7-121-30709-6

I. ①主… II. ①陆… III. ①微电子技术—封装工艺—缺陷检测 IV. ①TN405.94

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 314593 号

责任编辑: 张来盛 (zhangls@phei.com.cn)

印 刷: 北京天宇星印刷厂

装 订: 北京捷迅佳彩印刷有限公司

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: 720×1000 1/16 印张: 10.25 字数: 158 千字 彩插: 4

版 次: 2016 年 12 月第 1 版

印 次: 2016 年 12 月第 1 次印刷

印 数: 2 000 册 定价: 58.00 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, 联系及邮购电话: (010) 88254888, 88258888。

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。

本书咨询联系方式: (010) 88254467; zhangls@phei.com.cn。

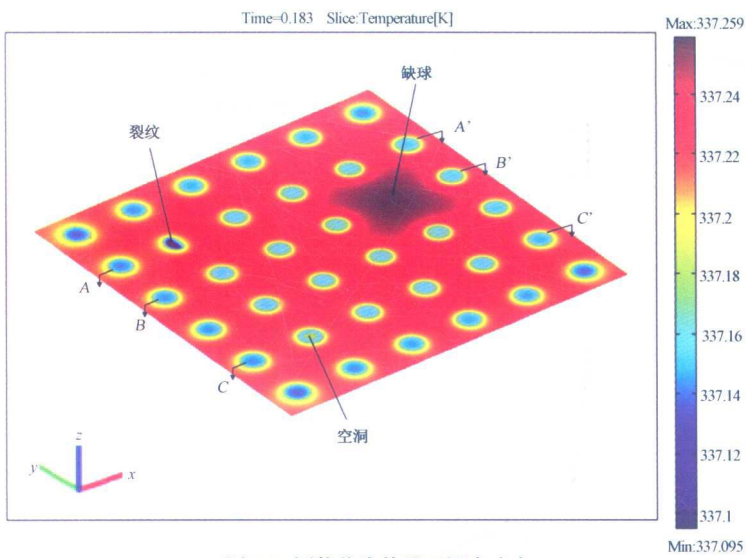


图 3.9 倒装芯片前端面温度分布

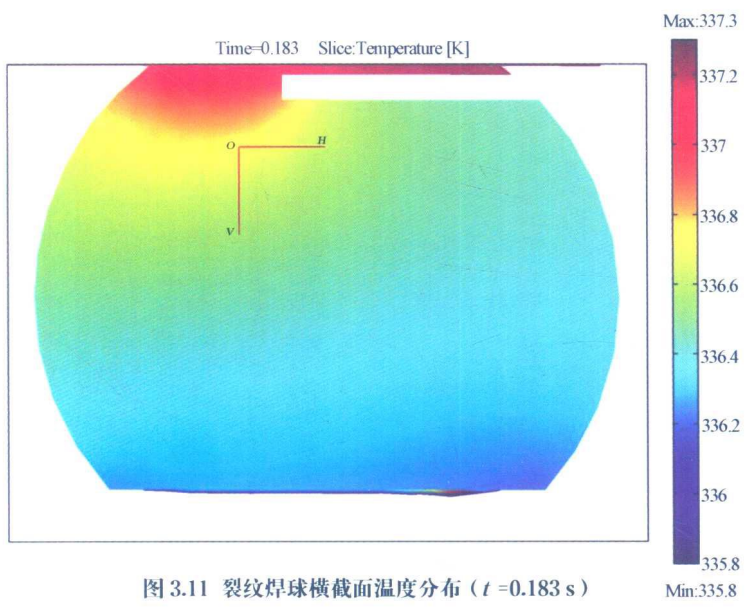


图 3.11 裂纹焊球横截面温度分布 ($t = 0.183 \text{ s}$)

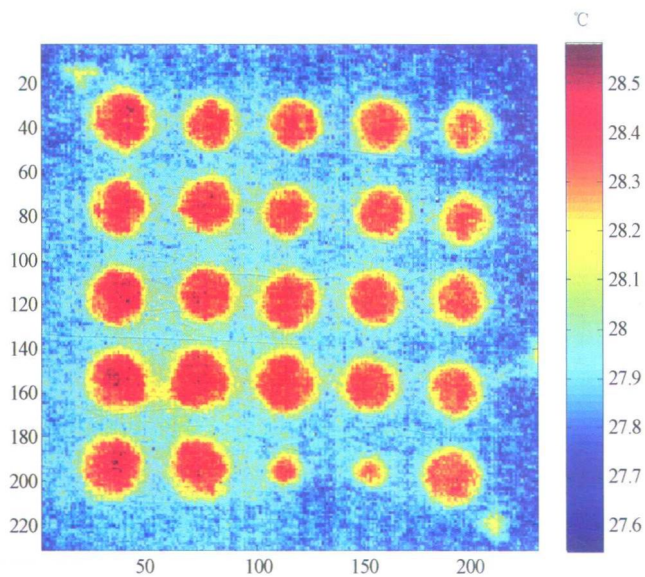


图 4.2 原始热图像 ($t=2.5\text{ s}$)

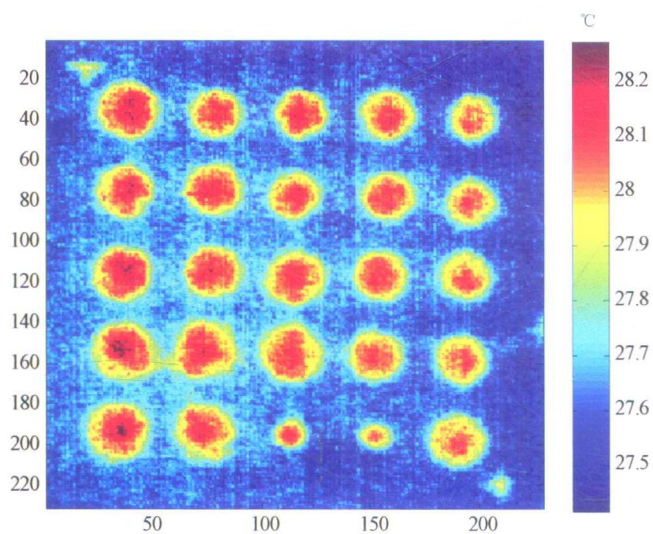


图 4.5 PCA 重建后的图像

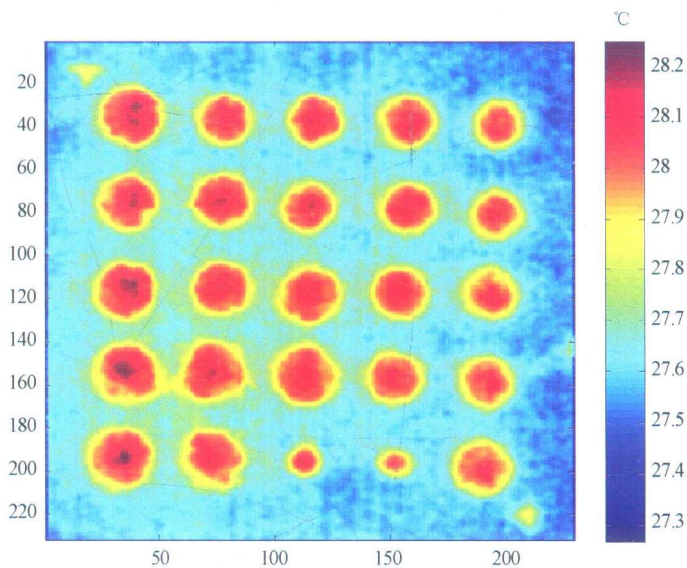


图 4.6 维纳滤波后的热图像

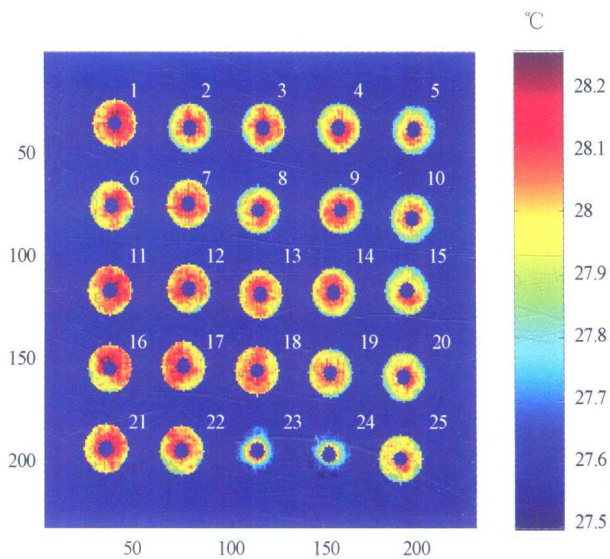


图 4.10 二值化模板分割后的图像

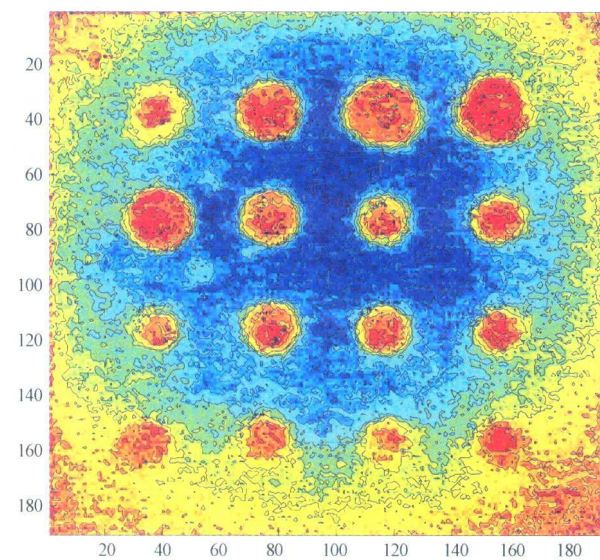


图 4.18 热对比图像及等值线

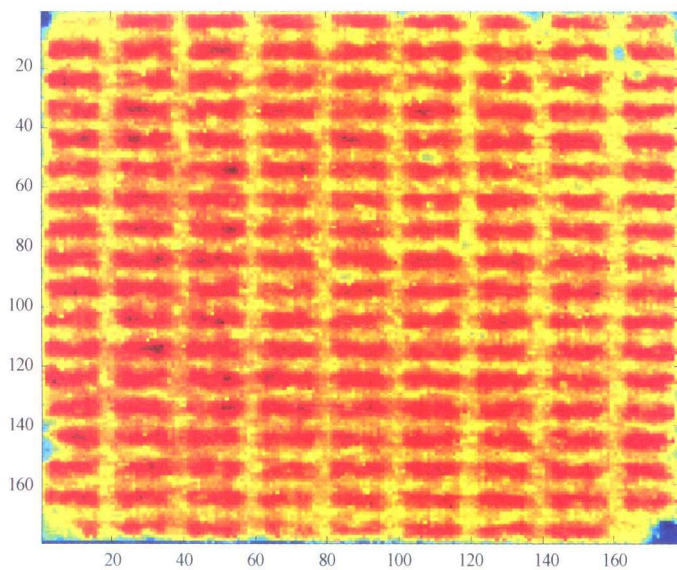


图 4.24 被测样片 FA10 原始热图像 ($t = 2.5 \text{ s}$)

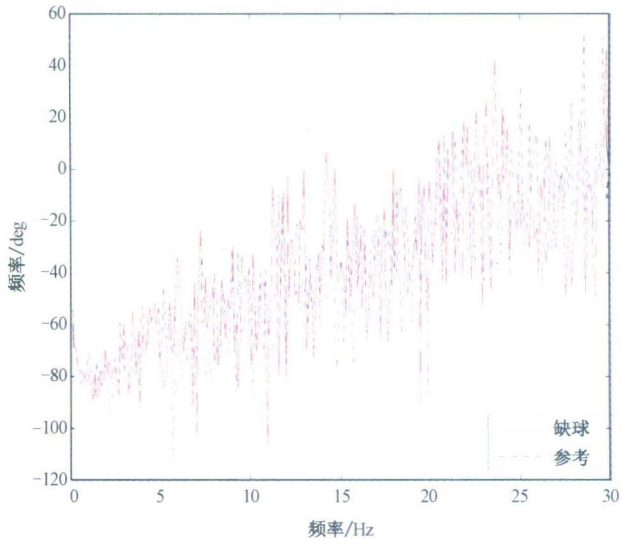


图 4.26 焊球的原始相频曲线

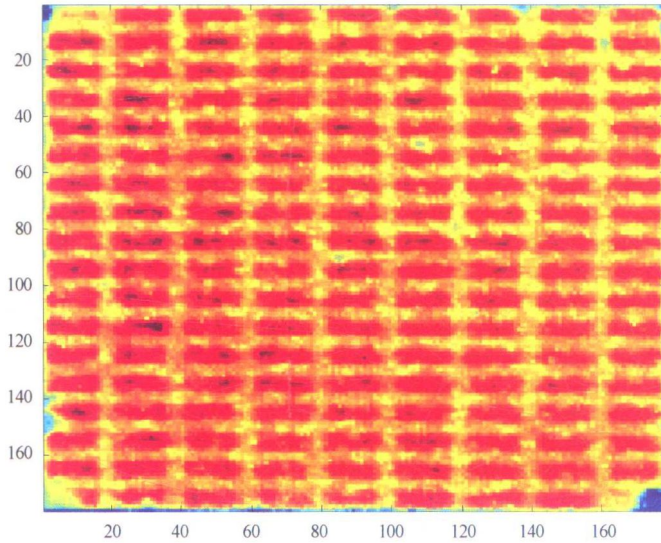


图 4.28 被测样片 FA10 拟合后的热图像

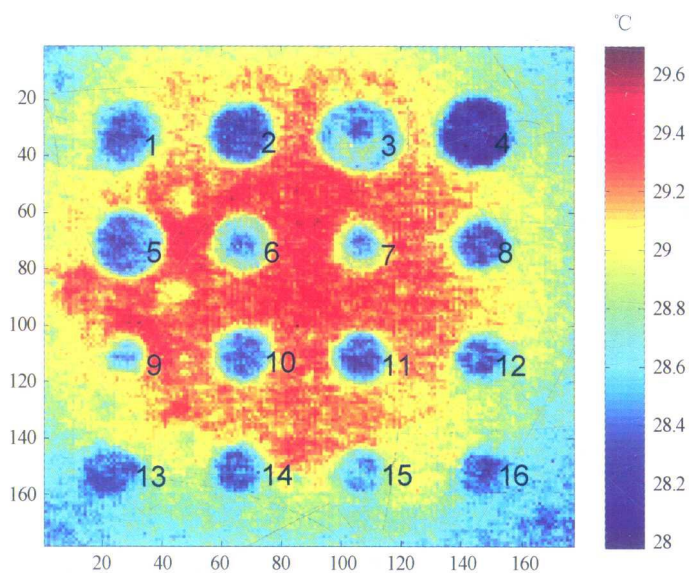


图 5.15 原始热图像 ($t = 0.417$ s)

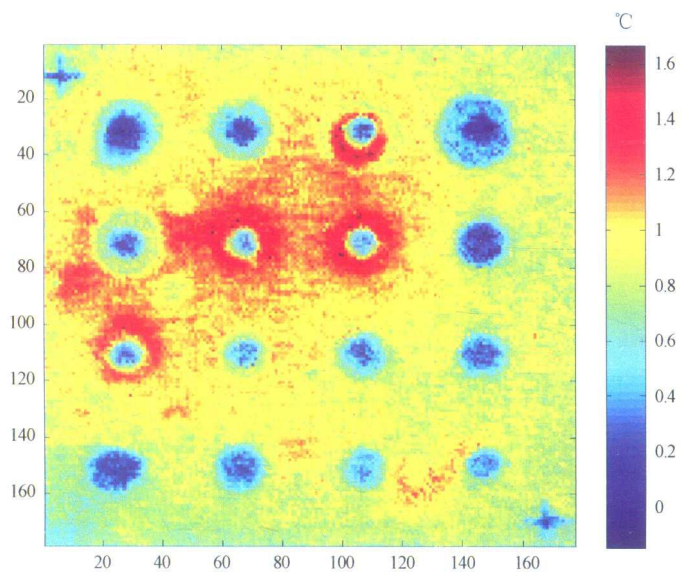


图 5.16 热源分布图

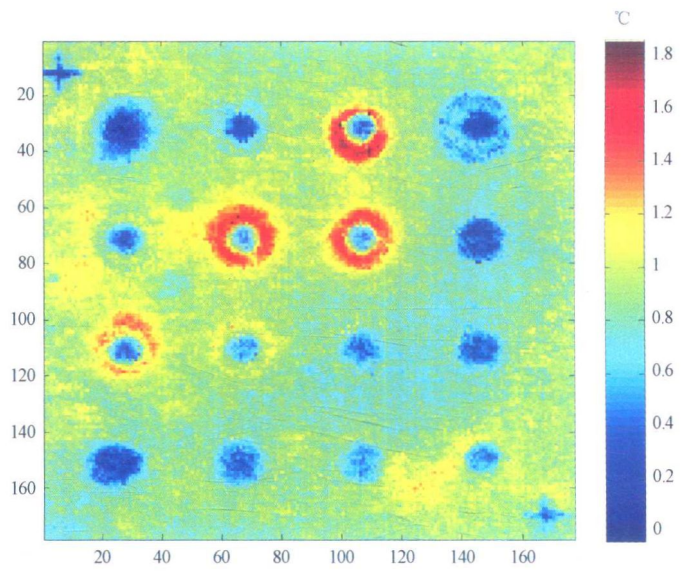


图 5.17 热对比图像

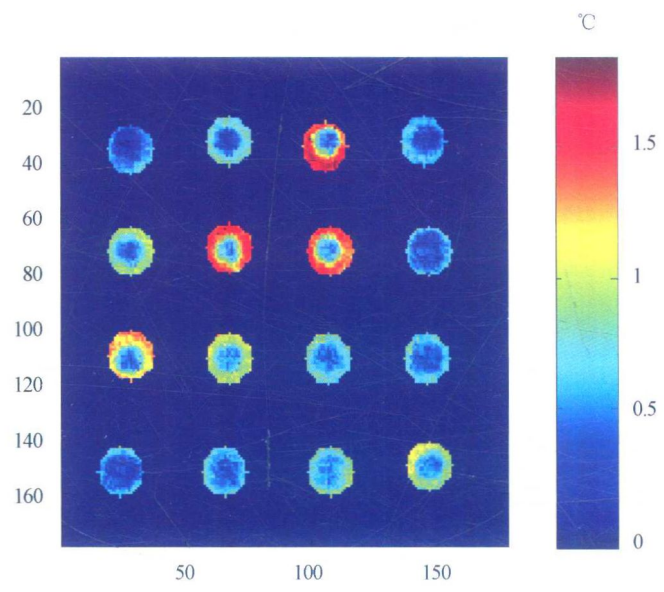


图 5.18 焊球分割后的图像

前 言

微电子封装互连是集成电路后道制造中最为关键、技术难度最大的环节，它不但直接影响着集成电路本身的电性能、机械性能、光性能和热性能，还在很大程度上决定着 IC 产品的小型化、多功能化、可靠性和成本。微电子封装技术正以惊人速度蓬勃发展，倒装焊技术、贯穿硅通孔在高密度微型化封装领域得到了快速发展和广泛应用，三维封装技术受到了越来越多的重视和研究。

随着 IC 特征尺寸的不断减小，IC 芯片的功率密度将迅速增加，尺度效应更加明显；由于封装材料无铅化要求、Low-K 材料引入等新特点，热/应力失配将更加严重，更容易导致封装界面变形、弯翘或划伤，出现疲劳、应力集中，产生键合缺陷失效；而倒装焊、贯穿硅通孔等主流互连技术中，微焊球、倒装凸点、填充硅通孔等隐藏于芯片或封装内部，其热性能分析及缺陷检测变得更加困难。微电子封装缺陷检测一直是业界热点。目前，封装缺陷检测方法通常分为接触式检测和非接触式检测两类。接触式检测技术效率低，成本高，且易于造成芯片表面损伤；非接触检测技术则不会造成器件损坏，可以检测到芯片中的微观特性，还能提供良好的工艺控制信息。

红外检测是一种非接触式、可在线监测的无损检测技术，它以红外辐射为基础，通过接收物体所发射的红外线，将物体温度及其分布情况显示出来，使检测者能够由此判断出物体内部状况。红外检测集光电成像、计算机数字信号处理、图像处理等技术于一体，是一门跨学科、跨领域的实用型技术，具有实时、准确、快速、灵敏度高、场测量等优点，已广泛应用于航空、航天、机械、医疗、石化、电力、电子等领域。随着计算机数字信号处理技术的迅速发展，以及人们对红外检测新方法的不断探索和实践，通过施加外部热激励的方式，打破被测物体内部热平衡，并将红外探测器件所获得的测量信号以热图像的方式呈现出来，即形成了主动红外热成像检测技术。

本书将主动红外热成像技术与微电子封装技术可靠性分析相结合，提出

了基于主动红外探测的微电子封装缺陷检测方法，采用光纤耦合半导体激光器对芯片或基底表面进行非接触式加热，通过红外热像仪获得芯片表面温度分布以及随时间的变化，通过热图像信号处理提取特征量，对封装缺陷进行诊断与识别，并详细介绍了热图像信号的解析方法。全书共 5 章，具体内容如下：第 1 章介绍微电子封装技术及其发展、典型的芯片互连技术，包括凸点倒装焊工艺以及传统的封装缺陷检测方法；第 2 章介绍红外检测基本原理、红外检测系统构成、红外无损检测方法，设计并构建主动红外微电子封装缺陷检测系统，并提出主动红外微凸点检测模型；第 3 章构建倒装焊芯片的热传导数学模型，并给出解析求解过程，采用有限元法仿真分析倒装焊内部热传导，并对焊球热性能进行表征；第 4 章介绍主分量分析法和脉冲相位成像法，提出一种亮斑自参考分析技术，并通过主动红外倒装焊凸点缺陷检测实验，详细阐述热图像的预处理方法和缺陷辨识技术；第 5 章介绍人工神经网络和模糊聚类分析方法，并利用 BP 神经网络、概率神经网络和改进的 c 均值模糊聚类方法对主动红外倒装焊检测热图像信号进行处理，通过对微凸点进行有效分类或聚类，实现缺陷辨识。本书旨在把红外无损检测技术与微电子封装可靠性分析结合起来，为 IC 产业提供一种新的缺陷检测技术和方法。为增强可读性，本书配有部分彩图，其中各图分别对应正文中相同编号的图。

本书的研究内容多取材于著者及所在课题组近年来的科研成果，同时也引用了许多专家学者公开发表的论文和正式出版的图书资料，在此表示衷心的感谢！本书的研究工作得到了国家自然科学基金项目（51305179）的资助。书中许多研究内容是在华中科技大学史铁林教授和廖广兰教授的指导下完成的，谨表深深谢意！著者的研究和本书的出版得到了江苏师范大学相关领导和同事们的鼓励 and 大力支持，在此深表感谢！

由于著者水平所限，书中难免存在不妥之处，敬请广大读者谅解并予以指正。

著者

2016 年 11 月

目 录

第 1 章 绪论.....	1
1.1 半导体技术的发展.....	1
1.2 微电子封装技术.....	2
1.2.1 微电子封装技术的发展.....	2
1.2.2 芯片互连技术.....	4
1.3 凸点倒装焊技术.....	7
1.3.1 凸点倒装焊技术及其工艺.....	7
1.3.2 凸点倒装焊可靠性.....	12
1.4 封装缺陷检测方法.....	16
第 2 章 红外无损检测技术.....	21
2.1 红外检测技术概述.....	21
2.2 红外检测系统组成.....	23
2.2.1 红外光学系统.....	24
2.2.2 红外探测器.....	25
2.2.3 红外热成像系统.....	28
2.3 主动红外无损检测方法.....	32
2.4 微电子封装红外检测系统.....	34
2.4.1 红外热像仪.....	35
2.4.2 激光加热系统.....	39
2.4.3 控制系统及附件.....	42

2.5	主动红外微凸点检测模型	43
第3章	主动红外检测仿真及焊球热性能分析	46
3.1	热量传递的一般形式	46
3.2	倒装焊芯片热传导数学建模	47
3.3	微凸点热性能仿真分析	55
3.3.1	倒装焊热阻网络	55
3.3.2	主动红外微凸点检测有限元分析	58
3.3.3	微凸点热性能表征与分析	67
3.4	小结	71
第4章	主动红外微凸点检测分析	72
4.1	主分量分析法	72
4.1.1	主分量分析的基本原理	72
4.1.2	检测实验及主分量分析流程	74
4.1.3	热图像的主分量分析法	77
4.2	热信号的自参考技术	86
4.2.1	红外检测及热斑自参考技术	86
4.2.2	微凸点的热信号自参考辨识	90
4.3	热信号的脉冲相位分析	95
4.3.1	脉冲相位成像法	95
4.3.2	红外检测微凸点相位辨识	97
4.4	小结	106

第 5 章 主动红外微凸点检测智能辨识方法.....	107
5.1 人工神经网络概述.....	107
5.1.1 人工神经网络的发展.....	107
5.1.2 神经元结构模型.....	108
5.1.3 人工神经网络的分类和特点.....	111
5.1.4 人工神经网络的发展方向和应用.....	113
5.2 BP 神经网络的微凸点热信号分析.....	115
5.2.1 BP 神经网络.....	115
5.2.2 微凸点 BP 神经网络分类.....	117
5.3 概率神经网络的微凸点热信号分析.....	123
5.3.1 概率神经网络.....	123
5.3.2 微凸点概率神经网络分类.....	126
5.4 微凸点模糊聚类分析方法.....	127
5.4.1 模糊聚类分析.....	127
5.4.2 特征加权的模糊 c 均值聚类分析.....	134
5.4.3 微凸点模糊聚类分析.....	138
参考文献.....	146

第 1 章 绪 论

在电子产品小型化和多功能化的需求下，电子封装技术高度集成并迈向了微时代。本书面向 IC 制造产业，在这一章中主要介绍微电子封装技术的发展和典型的芯片互连工艺，以及 IC 特征尺寸不断减小、封装密度进一步提高所带来的问题和挑战，同时阐述封装缺陷的产生和诊断检测方法。

1.1 半导体技术的发展

在全球信息化时代，电子信息技术极大地改变了人们的生活和工作方式，并成为衡量一个国家科技实力的重要标志之一。半导体集成电路（Integrated Circuit, IC）技术是电子信息产业的核心和基石，是计算机、网络、通信、自动控制、高端武器等众多领域的现代产品赖以生存和发展的基础。IC 产业是集国家利益、人类智慧和最新科技于一体的战略性产业^[1]，事关国家经济发展、国防建设和信息现代化建设，已成为当今世界经济、科技竞争的焦点，受到了世界各国的重视。

我国的 IC 产业经过了 40 多年的发展，经历了自 1965 年开始的初创期、1979 年改革开放后的探索发展期以及 1990 年之后的重点建设时期。特别是进入 20 世纪 90 年代以来，我国 IC 产业发展极为迅速，其产值规模从 90 年代初的 10 亿元发展到 2000 年的上百亿元，而随后仅仅 6 年时间，又扩大到了上千亿元。2010 年我国 IC 销售额超过 1 300 亿元，到 2015 年我国集成电路产业规模已不止翻一番，销售额超过 3 600 亿元。随着 IC 产业的发展，中国已成为世界上 IC 产品及其制造装备的主要市场之一。

目前，半导体集成电路设计、制造和封装测试一起并称为半导体产业的