

普通高等教育“十三五”规划教材
电子材料及其应用技术系列规划教材
电子科技大学特色教材

Advanced Technology of
Printed Circuit and Printed Electronics

印制电路与 印制电子先进技术

主 编 / 何 为
副主编 / 王守绪

Dianzi

Yinshua

Dianzi

下册



科学出版社

普通高等教育“十三五”规划教材
电子材料及其应用技术系列规划教材
电子科技大学特色教材

印制电路与印制电子先进技术(下)

何 为 主 编

王守绪 副主编

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书从印制电路与印制电子新技术、新材料、新工艺、新设备、信号完整性、可制造性、可靠性等方面全面系统地论述了何为教授团队近十年所取得的研究成果。本书内容涵盖了挠性及刚挠结合印制电路、高密度互联印制电路技术、特种印制电路技术、高频印制电路技术、图形转移新技术、基于系统封装的集成电路器件印制电路技术、集成电路封装基板技术、光电印制电路板技术、印制电路板的有限元热学分析、铜电沉积的电化学动力学原理及应用、高均镀能力电镀原理及应用、PCB 信号完整性影响因素仿真技术及应用、印制电路板焊接的无铅化与失效分析、印制电子技术、低温共烧陶瓷技术等先进技术，力求科学性、先进性、系统性和应用性的统一。鉴于印制电路未来发展趋势，本书还专门论述了何为团队近 5 年在印制电子领域取得的研究成果。本书共 16 章，分为上下两册，着重阐述基本概念和原理的，深入浅出，理论联系实际。每章都配有习题，指导读者深入学习。为了方便教学，还提供了与本书配套的多媒体教学课件。

本书可作为高等学校印制电路与印制电子专业的研究生和高年级本科生的教材，可供从事印制电路与印制电子、集成电路及系统封装的科研、设计、制造及应用等方面的科研及工程技术人员使用，也可作为具备大学物理、化学、材料、印制电路基本原理、电子电路基础的研究生及相关领域的科研人员与工程技术人员学习了解印制电路与印制电路技术先进技术的专业参考书。

图书在版编目(CIP)数据

印制电路与印制电子先进技术.下册 / 何为主编. —北京: 科学出版社, 2016.11

电子材料及其应用技术系列规划教材
ISBN 978-7-03-048393-5

I. ①印… II. ①何… III. 印刷电路-高等学校-教材②印刷-电子技术-高等学校-教材 IV. ①TN41

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 117172 号

责任编辑: 杨 岭 黄 嘉 / 责任校对: 杨悦蕾

责任印制: 余少力 / 封面设计: 墨创文化

科 学 出 版 社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

成都锦瑞印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年11月第一版 开本: 787×1092 1/16

2016年11月第一次印刷 印张: 21

字数: 498千字

定价: 76.00元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

《印制电路与印制电子先进技术》 编委会

顾 问 王龙基（中国印制电路行业协会名誉秘书长）

主 编 何 为（电子科技大学）

副 主 编 王守绪（电子科技大学）

编 委 （以姓氏汉语拼音排序）

陈苑明（电子科技大学）

何雪梅（电子科技大学）

王 翀（电子科技大学）

周国云（电子科技大学）

主 编 简 介

何为，男，教授，博士生导师。四川省有突出贡献的优秀专家，广东省创新创业团队带头人。1990年9月至1992年9月国家公派到意大利佛罗伦萨大学化学系做访问学者，2000年11月至2001年11月在佛罗伦萨大学化学系做客座教授。现任电子薄膜与集成器件国家重点实验室珠海分实验室主任，中国印制电路行业协会教育和培训工作委员会主任及全印制电子分会副会长，电子科技大学微电子与固体电子学院应用化学系主任。

出版教材3部，参与翻译专著1部。担任《印制电路原理和工艺》和《试验设计方法》两门四川省精品课程主持人。获四川省教学成果一等奖2项。在国内外刊物发表研究论文350余篇（其中SCI/EI论文100余篇）。申请国家发明专利60多项（其中30项已获授权）。

作为第二负责人获得2014年度国家科技进步二等奖1项，作为第一负责人获2011年教育部科技进步一等奖、2008年四川省科技进步二等奖、教育部科技进步二等奖各一项，以第二负责人获2011年广东省科技进步二等奖一项、2008年广东省科技进步二等奖一项。2010年获得广东省教育部、科技部及中国科学院授予的“优秀企业科技特派员”称号。分别于2010年和2015年获中国印制电路行业协会“园丁奖”。产学研合作成果被教育部评为2008~2010年度中国高校产学研合作十大优秀案例。2012年获中国产学研合作创新奖个人奖等。



序 一

何为教授印制电路研究团队多年来一直专注于印制电路关键共性技术的研究，特别是近十年与我国印制电路行业的产学研合作非常有特色，真正做到了将科技成果在企业转化成生产力，实现产业化，获得了良好的经济效益和社会效益，推动了我国印制电路行业的科学技术进步。

《印制电路与印制电子先进技术》一书是何为教授团队多年研究成果的凝练和总结，内容包括了其团队近十年发表的 300 篇研究论文、申请的 60 多项发明专利和获得国家科学技术奖的成果。作者把已有科学理论应用于生产实践的先进技术和经验撰写成能促进产业进步并给社会带来良好经济效益的著作，所以该书是一部很好的高等学校教材，同时也是一部应用性很强的技术著作。

我相信该书的出版对我国高校培养印制电路与印制电子专业高级专业人才非常有用，作为参考书对从事印制电路与印制电子、集成电路及系统封装的科研、设计、制造及应用等方面的科研及工程技术人员大有帮助。

推荐人签名



美国佐治亚理工学院董事教授

美国工程院院士

中国工程院院士(外籍)

2016年3月5日

序 二

如果说集成电路是一级封装，所有的电子信息整机产品，如电脑、电视机、手机、计算机等为三级封装，那么印制电路就是二级封装，起到承上启下、至关重要的作用，哪里有电子信息产品，哪里就一定会有印制电路。

何为教授率领的电子科技大学应用化学系，近三十年为中国印制电路行业培养了大批高级专业人才，为中国印制行业的发展壮大做出了巨大的贡献。更可贵的是，何为教授率领的印制电路研究团队，一直从事印制电路与印制电子的关键共性技术研究，特别是近十年与我国印制电路行业的骨干企业进行产学研合作，并将其科技成果在企业实现了零距离的转化，培育出了多家上市公司，取得了丰硕的研究及产业化成果。其产学研合作成果获得了 2014 国家科学技术进步二等奖，这是我国印制电路行业的第一个国家奖。

虽然在 2006 年我国就超过日本成为全球第一大 PCB 制造与应用大国，2015 年中国 PCB 产值达到 300 亿美元，占全球 PCB 总产值的 45%，但我们是大而不强。要实现我国印制行业的由大变强，人才是根本。《印制电路与印制电子先进技术》一书是何为教授撰写的国家“十一五”规划教材——《现代印制电路原理与工艺》(第二版)(2009 年，机械工业出版社)的姊妹篇。该书从印制电路与印制电子新技术、新材料、新工艺、新设备、信号完整性、可制造性、可靠性等方面全面系统地论述了何为教授团队近十年所取得的研究成果。我深信，该书的出版，能为我国印制电路行业培养更多的印制电路与印制电子的高级技术人员做出巨大贡献，让更多工程技术人员从中受益，必将有力地推动我国印制电路行业快速发展。

推荐专家签名



中国印制电路行业协会名誉秘书长，教授级高工

2016 年 3 月 1 日

前 言

电子信息产品向小型化、功能化、集成化和高可靠性方向发展,就要求作为集成电路(芯片)、电子元件、功能模块实现电气互联的载体——印制电路板向着高密度化、高频高速化、3D 任意安装、多功能化和高可靠性方向发展。印制电路(printed circuit board, PCB)在电子信息产业链中起着承上启下的作用。中国在 2006 年就超过日本成为全球第一大 PCB 制造与应用大国,2015 年中国 PCB 产值达到 300 亿美元,占全球 PCB 总产值的 45%。我国虽然是全球印制电路制造大国,但不是强国。因为我国企业的印制电路产品多为低技术含量、低附加值产品,高端印制电路系列高技术含量、高附加值的产品依赖进口。而且,国外企业对我国实行产品垄断和技术封锁,进而制约我国电子产品的升级换代。要实现我国印制电路由大到强的转变,就必须掌握印制电路的先进技术,这对于完善我国的电子信息产业链,提升印制电路企业整体的国际竞争力具有重要意义。

本书分上下两册,共 16 章。本书全面总结了何为教授的印制电路研究团队多年来在印制电路领域所取得的研究成果,尤其是近十年与中国的印制电路骨干企业进行产学研合作,把所取得的研究成果转化成生产力并实现产业化。何为教授团队在印制电路领域获得的研究成果获得了 2014 年国家科学技术进步二等奖,产学研合作成果获得了教育部 2008~2010 年度中国产学研合作十大优秀案例。这些成果都极大地推进了我国印制电路行业的科学技术进步,提高了我国印制电路骨干企业的国际竞争力。

本书是何为教授撰写的国家“十一五”规划教材——《现代印制电路原理与工艺》(第二版)(2009 年,机械工业出版社)的姊妹篇。《现代印制电路原理与工艺》是我国普通高校的第一部印制电路教材,主要偏重讲解基本原理和工艺。本着与《现代印制电路原理与工艺》内容不重复的原则,本书论述了近六年全球印制电路领域最新研究成果及何为教授研究团队近十年在印制电路和印制电子领域的研究成果。研究成果包含何为团队在国内外专业刊物发表的 300 余篇研究论文、60 多项发明专利、1 项国家科学技术进步二等奖、一项省部级 1 等奖、5 项省部级二等奖等。

本书从印制电路与印制电子新技术、新材料、新工艺、新设备、信号完整性、可制造性、可靠性等方面全面系统地论述了全球印制电路领域最新的研究成果及何为教授团队近十年所取得的研究成果。本书内容涵盖挠性及刚挠结合印制电路技术、高密度互联印制电路技术、特种印制电路技术、高频印制电路技术、图形转移新技术、基于系统封装的集成元器件印制电路技术、集成电路封装基板技术、光电印制电路板技术、印制电路板的有限元热学分析、铜电沉积的电化学动力学原理及应用、高均镀能力电镀原理及应用、PCB 信号完整性影响因素仿真技术及应用、印制电路板焊接的无铅化与失效分析、

印制电子技术、低温共烧陶瓷技术等先进技术，力求科学性、系统性、先进性和应用性的统一。鉴于印制电路未来发展趋势，本书还专门论述了何为团队近 5 年在印制电子领域取得的最新研究成果，全面体现了作者把科学理论应用于生产实践的先进技术和经验，促进了产业进步，给社会带来了良好的经济效益。

21 世纪初，印制电子(printed electronics)作为一门新兴交叉的综合性技术学科诞生，近几年广受各界关注，随着印制电子学科的兴起和发展，印制电子技术有取代传统印制电路制造工业的趋势。权威专家预测，在未来的 5~8 年内，在印制电路产业一定会出现用先进的印制电子技术取代传统印制电路制造技术的工业化革命。本书系统地论述了何为教授团队近 5 年在印制电子领域取得的最新研究成果，对支撑引领印制电路产业转型升级的印制电子技术进行了系统研究，为攻克印制电子技术取代传统印制电路技术在材料、设备和制造工艺上重大共性关键技术做好技术储备，积极跟上印制电路制造转型升级工业化革命的步伐。

本书建议授课学时为 80。各章内容相对独立，授课教师可根据实际需要取舍教学内容。为了方便教学，还提供了与本书配套的多媒体教学课件。

何为团队与中国印制电路企业产学研合作的 15 年中取得了丰硕的研究及产业化成果。在此过程中，电子科技大学“电子薄膜与集成器件国家重点实验室珠海分实验室”的依托单位——珠海方正科技多层电路板有限公司、珠海方正科技高密电子有限公司、珠海越亚封装基板技术股份有限公司、重庆方正科技高密电子有限公司、方正 PCB 研究院、博敏电子股份有限公司、广东光华科技股份有限公司、广州兴森快捷电路科技股份有限公司、深圳市景旺电子股份有限公司、奈电软性科技电子(珠海)有限公司、湖南奥士康科技股份有限公司等作为电子科技大学的产学研基地，无偿提供全部硬件条件，共同指导培养研究生，共同进行成果的转化。如果没有这些企业的支持和帮助，就不可能取得这么丰硕的成果，也就不可能有《印制电路与印制电子先进技术》这部高等学校的教材。在此，本人对这些企业的大力支持和帮助表示衷心的感谢！本书在编写过程中，参考了国内外著作和文献(列于书末参考文献)，引用了其中的一些内容和实例，在此对这些文献的作者表示诚挚的感谢！

何为教授团队已经毕业的和在读的研究生共 50 余人，都对本书做出了贡献，在此一并表示诚挚的谢意。其中，已毕业的博士研究生唐耀参加了第 14 章部分内容的撰写，冀林仙参加了第 11 章部分内容的撰写。已毕业的硕士研究生黄雨新参加了第 2 章部分内容的撰写，宁敏洁参加了第 5 章部分内容的撰写，李瑛和成丽娟参加了第 4 章部分内容的撰写，何朋参加了第 12 章部分内容的撰写，冯立、何杰和江俊峰参加了第 3 章部分内容的撰写。在读博士研究生向静参加了第 7 章部分内容的撰写，在读博士研究生林建辉、朱凯、郑莉及在读硕士研究生陈国琴、李玖娟等直接参与了本书撰写过程中成果的整理、图表的规范、文字编排、校正等工作，为该书的出版付出了辛勤的劳动，再次表示感谢！

本书由四川省有突出贡献的优秀专家、广东省创新团队带头人何为教授担任主编，

何为团队的王守绪教授、王翀博士、陈苑明博士、周国云博士、何雪梅博士参加撰写。何为撰写第 8、14 及 15 章，王守绪撰写第 3、4、5 章，王翀撰写第 2、10、11 章，陈苑明撰写第 9、12、13 章，周国云撰写第 6、16 章，何雪梅撰写第 1、7 章。全书由何为教授整理定稿。重庆大学张胜涛教授对全书进行了审定，在此，深表谢意！

本书得到了广东省创新创业团队用人单位——广东光华科技股份有限公司鼎力相助，并得到了广东省创新创业团队项目(项目编号：201301C0105324342)的资助，在此一并表示衷心的感谢！

对书中存在的错误和不妥之处，真诚希望相关领域专家与广大读者给予批评指正！



2016 年 3 月 31 日

目 录

第 9 章 印制电路板的热学及热应力耦合场分析	1
9.1 热传导理论概述	1
9.1.1 热传导基本定律	1
9.1.2 热传导与热传导方程	1
9.1.3 热对流与热辐射	2
9.2 有限元热分析	4
9.2.1 有限元介绍	4
9.2.2 有限元分析流程	4
9.3 印制电路板的有限元热分析	7
9.3.1 热仿真对象分析	7
9.3.2 热仿真关键步骤	8
9.3.3 稳态热力分析实例	9
9.3.4 瞬态热力分析实例	15
9.3.5 载荷随时间变化的瞬态热力分析实例	18
9.4 印制电路板的有限元热应力分析	20
9.4.1 模型建立	20
9.4.2 仿真分析与结果	22
习题	24
第 10 章 铜电沉积的电化学动力学原理及应用	25
10.1 PCB 电镀铜技术概述	25
10.1.1 电镀铜技术发展	26
10.1.2 PCB 电镀铜镀液发展和趋势	27
10.1.3 新型酸铜镀液研发	29
10.2 金属电沉积动力学原理	36
10.2.1 电化学动力学基础	36
10.2.2 铜的电结晶	38
10.2.3 均镀能力与整平原理	38
10.2.4 PCB 电镀铜的电化学原理	39
10.3 电镀铜镀液各组份性能与作用	40
10.3.1 酸性电镀铜概述	40
10.3.2 抑制剂在电镀液中的作用	41
10.3.3 光亮剂在电镀液中的作用	42

10.3.4	整平剂在电镀液中的作用	44
10.3.5	无机组分在电镀液中的作用	46
10.3.6	阳极与镀液间的相互影响	47
10.3.7	副产物对电镀性能的影响	48
10.4	电镀铜镀液电化学分析技术	49
10.4.1	CVS 分析技术	50
10.4.2	其他镀液添加剂分析技术	56
10.5	电镀铜镀液使用与维护	56
10.5.1	镀液稳定性与电镀均匀性	57
10.5.2	杂质金属离子在镀液中的影响	58
10.5.3	镀液维护技术	60
	习题	60
第 11 章	高均镀能力电镀原理及应用	62
11.1	高均镀能力电镀技术概述	62
11.1.1	高均镀能力电镀铜工艺发展概述	63
11.1.2	均匀电镀理论	64
11.1.3	多物理场耦合方法研究 PCB 电镀铜	66
11.2	高厚径比通孔均匀电镀铜原理及应用	69
11.2.1	高厚径比通孔电镀铜的技术特点	69
11.2.2	高厚径比通孔均匀电镀铜模型	70
11.2.3	高厚径比通孔均匀高速电镀原理	73
11.2.4	高厚径比通孔镀层异形现象及理论解析	74
11.3	HDI 微盲孔填充技术	75
11.3.1	HDI 微盲孔填铜的理论模型	75
11.3.2	HDI 微盲孔填铜异常现象及理论解析	79
11.3.3	HDI 微盲孔填铜的技术应用	79
11.4	封装基板全加成镀铜技术	80
11.4.1	电镀铜柱工艺	81
11.4.2	电镀铜柱理论模型	82
11.4.3	解决电镀铜柱整板均匀性、良率等问题的理论支持	83
11.4.4	电镀铜柱的理论应用	85
11.5	挠性多层板互连镀铜技术	85
11.5.1	挠性板通孔填充电镀的理论模型	85
11.5.2	微通孔的电镀铜填充技术	86
11.5.3	挠性板的多层互连技术	87
11.6	电镀铜前处理技术	88
11.6.1	前处理对镀铜质量的影响	88
11.6.2	聚合物导电技术	90

11.6.3	预浸加速技术	90
11.7	电镀铜装备及其在 PCB 制造中的应用	92
11.7.1	改进型龙门线	92
11.7.2	垂直连续电镀电镀线	93
11.7.3	水平电镀线	93
	习题	94
第 12 章	PCB 信号完整性影响因素仿真技术及应用	95
12.1	印制电路板与信号完整性的基本原理	95
12.1.1	信号完整性基础	95
12.1.2	传输线基本原理	98
12.1.3	传输线的串扰	100
12.1.4	传输线的反射	102
12.1.5	有损传输线理论	105
12.1.6	差分线的传输特性	107
12.2	印制电路板信号完整性的仿真技术	108
12.2.1	信号完整性仿真技术概述	108
12.2.2	信号完整性常用仿真分析软件介绍	109
12.2.3	IBIS 模型与 SPICE 模型	109
12.3	传输线几何结构对信号完整性的影响仿真	112
12.3.1	导线宽度与导线间距对信号完整性的影响	112
12.3.2	导线表面粗糙度与趋肤效应	113
12.3.3	返回平面不连续对信号完整性的影响	114
12.3.4	弯曲不连续对信号完整性的影响	114
12.3.5	过孔效应	115
12.4	PCB 制造过程对信号完整性的影响	116
12.4.1	PCB 设计对信号完整性的影响	116
12.4.2	PCB 材料对信号完整性的影响	118
12.4.3	PCB 制造工艺对信号完整性的影响	120
	习题	123
第 13 章	印制电路板焊接的无铅化与失效分析	124
13.1	无铅焊接技术概述	124
13.1.1	无铅化对印制电路板焊料的性能要求	124
13.1.2	无铅化对印制电路板基材的性能要求	126
13.2	印制电路板无铅焊接技术	131
13.2.1	无铅焊料的组成与类型	131
13.2.2	无铅焊料的转移方法	132
13.2.3	无铅焊接方法	134
13.2.4	无铅焊接界面的金属间化合物	137

13.3	印制电路板焊接无铅化失效分析技术	142
13.3.1	外观检查	142
13.3.2	X射线透视检查	143
13.3.3	金相切片分析	145
13.3.4	超声扫描显微镜检查	146
13.3.5	红外热相分析	149
13.3.6	红外光谱分析	151
13.3.7	扫描电子显微镜检测及元素能谱分析	153
13.3.8	染色与渗透检测	155
13.3.9	焊点力学检测	156
13.4	印制电路板焊接的失效案例分析	158
13.4.1	焊点吹孔失效分析	159
13.4.2	焊点空洞失效分析	161
13.4.3	黑焊盘失效分析	162
13.4.4	锡须生长失效分析	164
13.4.5	焊接的爆板失效分析	167
13.4.6	焊点的电迁移失效分析	170
13.4.7	焊点的机械失效分析	172
13.4.8	焊点的热疲劳失效分析	174
13.4.9	焊点的温变失效分析	175
	习题	176
第14章	印制电子技术——材料篇	177
14.1	印制电子技术概述	177
14.1.1	印制电子的定义及其技术特点	177
14.1.2	印制电子技术的应用及发展趋势	179
14.2	印制电子导电油墨	182
14.2.1	印制电子对导电油墨的性能要求	182
14.2.2	印制电子导电纳米颗粒合成方法	187
14.2.3	印制电子导电油墨制作技术	189
14.2.4	金属导电油墨烧结技术	190
14.2.5	无颗粒型导电油墨	193
14.3	印制电子导电胶	194
14.3.1	导电胶的主要组成	194
14.3.2	导电胶的导电机理	195
14.3.3	影响导电胶导电性能的因素	196
14.3.4	提高导电胶接触电阻稳定性的方法	200
14.3.5	导电胶可靠性分析方法	203
14.4	印制薄膜晶体管材料	204

14.4.1	薄膜晶体管概述	204
14.4.2	印制有机半导体材料性能要求	205
14.4.3	印制P型有机半导体材料	206
14.4.4	印制N型有机半导体材料	215
14.4.5	印制双极型有机半导体材料	218
14.4.6	印制无机半导体材料	219
14.4.7	印制薄膜晶体管工艺技术	222
14.5	其他印制电子材料	227
14.5.1	印制传感材料	227
14.5.2	印制有机薄膜太阳能电池材料	229
14.5.3	印制有机电致发光材料	231
14.5.4	印制埋嵌电阻材料	232
14.6	印制电子技术的发展前景	233
	习题	234
第15章	印制电子技术——工艺篇	235
15.1	印制电子性能要求	235
15.2	丝网印刷技术	238
15.2.1	丝网印刷工作原理及技术特点	238
15.2.2	丝网印刷网版制作	240
15.2.3	丝网印刷工艺的控制因素	241
15.2.4	丝网印刷面临的技术难题	242
15.3	喷墨打印技术	243
15.3.1	喷墨打印工作原理及技术特点	244
15.3.2	喷墨打印对设备的要求	245
15.3.3	喷墨打印技术在印制电子中的应用	246
15.3.4	喷墨打印技术面临的技术难题	247
15.4	快速印制技术	247
15.4.1	凹版印刷技术	247
15.4.2	凸版柔性印刷技术	249
15.5	微纳印制技术	251
15.5.1	微纳压印技术	251
15.5.2	气溶胶喷墨打印技术	253
15.5.3	电流体动力学打印技术	255
15.6	其他印制技术	256
15.6.1	胶印	256
15.6.2	烫印	257
15.6.3	激光诱发前向转移技术	258
15.7	印制电子前/后处理技术	259

15.7.1	印制电子前处理技术	259
15.7.2	印制电子后处理技术	260
	习题	263
第 16 章	低温共烧陶瓷技术	264
16.1	LTCC 技术简介	264
16.2	LTCC 材料制备	266
16.2.1	LTCC 导电材料的制备	266
16.2.2	LTCC 材料的制备	268
16.2.3	内埋嵌式材料	273
16.3	LTCC 制造技术	274
16.3.1	流延	275
16.3.2	冲孔	278
16.3.3	填孔	279
16.3.4	印刷图形	280
16.3.5	叠片	281
16.3.6	层压	282
16.3.7	热切	282
16.3.8	排胶	282
16.3.9	烧结	283
16.3.10	表面处理和被银电极	284
16.4	LTCC 内埋置无源器件技术	284
16.4.1	埋嵌电阻技术	285
16.4.2	埋嵌电容技术	286
16.4.3	埋嵌电感技术	287
16.5	LTCC 多层基板的应用	288
16.5.1	大型高速计算机	288
16.5.2	汽车电子控制单元(ECU)	288
16.5.3	高频部件	288
16.5.4	光通信用界面模块及 HEMT 模块	289
16.6	LTCC 技术的发展趋势	289
16.6.1	LTCC 材料的发展趋势	289
16.6.2	LTCC 工艺技术的发展趋势	290
	习题	291
	参考文献	293

第9章 印制电路板的热学及热应力 耦合场分析

目前,高性能的电子产品需要 HDI 板的高密度化和高精度化,与此同时芯片集成度也不断提高,封装的 I/O 引脚数急剧增加,与之伴随的就是功耗的增大和发热量的增加,相应的电子产品工作的环境温度也发生极大的变化,而且 HDI 板与 IC 中存在大量的异材连接,发热量在不同材料的界面处所带来的热效应会导致膨胀不均匀,就会形成彼此相互约束,从而不可避免地产生热应力。为了提高 HDI 板抗变形能力,降低热应力,改善产品的热性能及提高产品工作的稳定性及寿命,相关热应力仿真分析的必要性也不言而喻,本章的意义是为印制电路板的电路结构设计和散热方式的选择提供一个判断依据。

9.1 热传导理论概述

热传递是热从温度高的物体传到温度低的物体,或者从物体的高温部分传到低温部分的过程,其中包含三种热传递机理:传导、对流和辐射。

9.1.1 热传导基本定律

传导是固体中热传递最重要的方式,传导并不牵涉物体运动,金属中以电子传热为主,而一些绝缘性能好而导热也好的固体材料中,热能的携带者只能是声子。

热量的传导方式从高温区传向低温区,如图 9-1 所示。

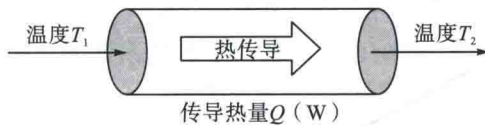


图 9-1 热量传导方式示意图

完全接触的两个物体之间或一个物体的不同部分之间由于温度梯度而引起的内能的交换被称为热传导,实验证明,热流密度 q 和温度梯度成正比,如下式所示:

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (9-1)$$

式中, λ 为导热系数($W/(m \cdot ^\circ C)$),它是衡量晶体导热性能的物理量; q 表示热流密度(W/m^2),它是单位时间垂直通过单位面积的热流;负号表示热能逆着温度梯度的方向传播。

9.1.2 热传导与热传导方程

导热系数是一种材料属性,也是有限元热分析中最重要的参数之一,其定义为在单位温度梯度作用下物体内所产生的热流密度,表示材料通过传导的方式传递热能的效率,通常用 λ 表示,单位为($W/(m \cdot ^\circ C)$)。同时也可理解为在稳定传热条件下,1m 厚的材