

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

上册



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(上)

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、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.上册 / 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 978-7-03-048392-8

I. ①印… II. ①何… III. ①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 117170 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: 22 1/2

字数: 539 千字

定价: 79.00 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）

王一翀（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。

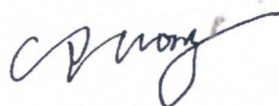
序 一

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的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艺的趋势。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最衷心的感谢!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!

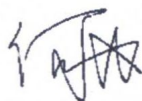
何为教授团队已经毕业的和在读的研究生共50余人,都对本书做出了贡献,在此一并表示诚挚的谢意。其中,已毕业的博士研究生唐耀参加了第14章部分内容的撰写,冀林仙参加了第11章部分内容的撰写。已毕业的硕士研究生黄雨新参加了第2章部分内容的撰写,宁敏洁参加了第5章部分内容的撰写,李瑛和成丽娟参加了第4章部分内容的撰写,何朋参加了第12章部分内容的撰写,冯立、何杰和江俊峰参加了第3章部分内容的撰写。在读博士研究生向静参加了第7章部分内容的撰写,在读博士研究生林建辉、朱凯、郑莉及在读硕士研究生陈国琴、李玖娟等直接参与了本书撰写过程中成果的整理、图表的规范、文字编排、校正等工作,为该书的出版付出了辛勤的劳动,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 1 章 挠性及刚挠结合印制电路技术	1
1.1 挠性印制电路板概述	1
1.1.1 挠性印制电路板的定义及分类	1
1.1.2 挠性印制电路板的性能特点及用途	5
1.2 挠性印制电路板材料的基本性能要求	6
1.2.1 挠性覆铜箔基材	6
1.2.2 黏结片薄膜材料	12
1.2.3 覆盖层材料	12
1.2.4 增强板材料	14
1.3 挠性印制电路板的制造工艺技术	15
1.3.1 片式挠性印制电路板制造工艺技术	15
1.3.2 挠性印制电路板 RTR 制造工艺技术	20
1.4 刚挠结合印制电路板	22
1.4.1 刚挠结合印制板概述	22
1.4.2 反复挠曲型刚挠结合印制板制造工艺技术	24
1.4.3 半弯曲型刚挠结合印制板制造工艺技术	26
1.4.4 嵌入挠性线路刚挠结合印制电路板制造工艺技术	30
1.5 挠性及刚挠结合印制板的性能检测方法及其发展趋势	33
1.5.1 挠性及刚挠结合印制板的性能测试方法	33
1.5.2 挠性及刚挠结合印制板的发展趋势	36
习题	37
第 2 章 高密度互联印制电路技术	38
2.1 HDI/BUM 印制电路板概述	38
2.1.1 HDI/BUM 印制电路板的特点、用途及分类	38
2.1.2 HDI/BUM 印制电路板材料性能要求	40
2.2 含芯板 HDI/BUM 印制电路板制造工艺技术	42
2.2.1 含芯板 HDI/BUM 印制电路板制造工艺流程	42
2.2.2 含芯板 HDI/BUM 印制电路板导通孔堵塞技术	43
2.2.3 含芯板 HDI/BUM 印制电路板导通微孔制作关键技术	45
2.3 无芯板 HDI/BUM 印制电路板制造工艺技术	49

2.3.1	无芯板 HDI/BUM 印制电路板制造工艺技术概述	49
2.3.2	高级凸块积层技术	50
2.3.3	一次层压技术	50
2.3.4	嵌入凸块互联技术	51
2.3.5	任意层内通孔积层技术	53
2.3.6	铜凸块导通互联技术	56
2.3.7	任意层叠孔互联技术	56
2.4	HDI/BUM 印制电路板可靠性测试与评价	57
2.4.1	HDI/BUM 印制电路板可靠性测试	57
2.4.2	HDI/BUM 印制电路板品质管理	59
	习题	61
第 3 章	特种印制电路技术	62
3.1	特种印制电路技术现状、分类及特点	62
3.2	金属基(芯)印制电路板制造技术	63
3.2.1	金属基印制电路板的概述	63
3.2.2	金属基印制电路板材料性能及其结构	64
3.2.3	金属基印制电路板发展趋势	69
3.2.4	金属基印制电路板制造技术及工艺	71
3.2.5	铁基、铝基印制电路板制作技术比较	77
3.2.6	金属基板的热阻性能测试	80
3.3	陶瓷基印制电路板制造技术	83
3.3.1	陶瓷基印制电路板的特点及应用	83
3.3.2	陶瓷基印制电路板材料及常见基板简介	86
3.3.3	陶瓷基印制电路板制造工艺技术	90
3.3.4	几种陶瓷基印制电路板简介	95
3.4	大电流(厚铜层)印制电路板制造技术	98
3.4.1	大电流(厚铜层)印制电路板概述	98
3.4.2	大电流(厚铜层)印制电路板厚铜箔主要性能要求	101
3.4.3	大电流(厚铜层)印制电路板制造工艺技术	104
3.4.4	大电流(厚铜层)埋/盲孔多层板制造技术	110
	习题	114
第 4 章	高频印制电路技术	115
4.1	高频印制电路板概述	115
4.1.1	高频印制电路板简介	115
4.1.2	高频对 PCB 基板材料的特性要求	116

4.1.3	高频 PCB 常用覆铜板	116
4.1.4	各种高频基板多种性能对比	122
4.2	信号高频化产生的问题及其解决方案	122
4.2.1	信息高频化问题	122
4.2.2	信号高频化问题的处理方法	123
4.2.3	信号高频化对 PCB 设计方面的要求	123
4.2.4	信号高频化对 PCB 加工的要求	125
4.2.5	信号高频化对基板材料的要求	125
4.3	高导热树脂的开发	127
4.3.1	实现基板导热的途径	128
4.3.2	高导热树脂开发与应用	128
4.3.3	高分子树脂热导机理的探讨	129
4.3.4	高导热性环氧树脂的开发与应用	132
4.4	埋铜印制电路板技术	133
4.4.1	埋铜 PCB 简介	133
4.4.2	埋铜 PCB 工艺制作要点	133
4.4.3	埋铜 PCB 制作流程	136
4.4.4	埋铜 PCB 常见问题及解决方法	136
4.5	高低频混压印制电路板	137
4.5.1	高低频混压 PCB 制作流程	138
4.5.2	高低频混压 PCB 制作要点	139
4.5.3	高低频混压 PCB 常见问题及解决方法	141
4.5.4	高低频埋铜混压 PCB 制造技术	141
	习题	143
第 5 章	图形转移新技术	144
5.1	图形转移新技术概述	144
5.1.1	图形转移技术的定义及分类	144
5.1.2	图形转移技术的基本材料	146
5.1.3	光致抗蚀剂图形转移工艺流程	152
5.1.4	图形转移技术的发展	159
5.2	LDI 技术	163
5.2.1	LDI 技术的原理与技术特点	163
5.2.2	激光直接成像技术的专用光致抗蚀剂材料	166
5.2.3	激光直接成像技术工艺流程	175
5.3	图形电镀加成技术	176

5.3.1	图形电镀半加成技术的原理	176
5.3.2	图形电镀半加成技术的工艺流程	176
5.3.3	图形电镀半加成法制作精细线路效果	176
5.3.4	丝印与电镀结合技术	177
5.3.5	硝酸蚀刻技术	177
5.4	激光直接成型技术	179
5.4.1	激光直接成型技术原理及工艺	179
5.4.2	激光直接成型技术专用材料的特性	183
5.4.3	激光直接成型技术的优势及应用实例	186
5.5	微纳压印技术	187
5.5.1	微纳压印技术简介	187
5.5.2	微纳压印技术的工艺	190
5.5.3	微纳压印技术在 PCB 领域中的应用前景	196
	习题	198
第 6 章	基于系统封装的集成元器件印制电路技术	199
6.1	集成元器件印制电路的定义、分类及特点	199
6.2	集成元器件印制电路板埋嵌电阻的工艺技术	201
6.2.1	埋嵌电阻用材料分类及性能	201
6.2.2	埋嵌电阻中方阻的定义	206
6.2.3	丝网印刷方法制作埋嵌电阻的工艺技术	207
6.2.4	喷墨打印方法制作埋嵌电阻的工艺技术	210
6.2.5	蚀刻方法制作埋嵌电阻的工艺技术	211
6.2.6	电镀与化学镀方法制作埋嵌电阻的工艺技术	213
6.2.7	溅射方法制作埋嵌电阻的工艺技术	214
6.2.8	低温烧结方法制作埋嵌电阻的工艺技术	214
6.3	集成元器件印制电路板埋嵌电容工艺技术	214
6.3.1	埋嵌电容的材料分类及性能	215
6.3.2	埋嵌电容的形成与功能	216
6.3.3	蚀刻方法制作埋嵌电容的工艺技术	218
6.3.4	丝网印刷方法制作埋嵌电容的工艺技术	220
6.3.5	喷墨打印方法制作埋嵌电容的工艺技术	221
6.3.6	电镀(溅射)方法制作埋嵌电容的工艺技术	221
6.4	集成元器件印制电路板埋嵌电感工艺技术	222
6.4.1	埋嵌电感的构造	222
6.4.2	喷墨打印方法制作埋嵌电感的工艺技术	223

6.4.3	通孔与磁芯相结合制作埋嵌电感的工艺技术	224
6.4.4	提高电感值埋嵌磁芯技术	225
6.5	集成元器件印制电路板埋嵌芯片工艺技术	226
6.5.1	优先埋嵌芯片工艺	227
6.5.2	中程埋嵌芯片工艺	228
6.5.3	后程埋嵌芯片工艺	230
6.5.4	开窗技术	232
6.6	集成元器件印制电路板的问题	235
	习题	235
第7章	集成电路封装基板技术	237
7.1	IC封装基板概述	237
7.1.1	封装概述	237
7.1.2	IC封装技术	238
7.1.3	一种新型封装技术——埋嵌芯片技术	244
7.1.4	IC封装基板概念、特点及作用	246
7.1.5	IC封装基板的分类	247
7.2	IC有机封装基板工艺技术基本概念	248
7.2.1	无芯层板技术制作单双面板	248
7.2.2	HDI技术制作双面板	260
7.3	基于HDI工艺的有机封装基板制造技术	263
7.3.1	基于HDI工艺的封装基板制造技术基本概念及分类	263
7.3.2	HDI工艺制造封装基板技术的流程	265
7.4	无核铜柱工艺制造有机封装基板技术	267
7.4.1	无核铜柱工艺制造封装基板技术的基本概念	267
7.4.2	无核铜柱制造封装基板技术的流程	267
7.5	有机封装基板材料	270
7.5.1	铜箔	270
7.5.2	半固化片	272
7.5.3	有机树脂	272
7.5.4	增强材料	275
7.6	无机封装基板工艺技术	276
7.6.1	无机封装基板的基本概念	276
7.6.2	无机封装基板的制作	278
7.7	全球IC封装基板市场现状及发展	280
7.7.1	全球IC封装基板市场发展现状	280

7.7.2 全球 IC 封装基板技术发展	281
习题	282
第 8 章 光电印制电路板技术	283
8.1 光电印制电路板的背景	283
8.1.1 电互联与光互联	283
8.1.2 光互联的种类	284
8.1.3 印制电路板的七个时代	285
8.1.4 光电印制电路板的发展现状	285
8.2 光电印制电路板的工作原理	287
8.2.1 光电印制电路板的定义	287
8.2.2 光电印制电路板的工作原理	288
8.2.3 光耦合结构及其对准技术	289
8.2.4 光电印制电路板的三个时代	292
8.3 光电印制电路板用光波导材料	294
8.3.1 光波导材料的结构	294
8.3.2 光波导材料的性能要求	295
8.3.3 主要光波导用聚合物材料	296
8.3.4 聚合物光波导材料性能提高方法	301
8.4 聚合物光波导的制作工艺	302
8.4.1 反应离子蚀刻	303
8.4.2 平版影印	304
8.4.3 激光刻蚀技术	305
8.4.4 加热模压	305
8.4.5 激光直接写入	306
8.4.6 电子束写入法	306
8.4.7 光漂白技术	306
8.5 光电印制电路板的检测	308
8.5.1 折射率测试	308
8.5.2 光传输损失测试	310
8.5.3 形貌测试	313
8.5.4 眼图测试	313
8.5.5 误码性	315
8.5.6 环境测试	315
习题	315
参考文献	317

第 1 章 挠性及刚挠结合印制电路技术

毫无疑问挠性印制电路技术是当今最重要的互连技术之一，几乎每一类电子产品中都有其应用，从简单的玩具、游戏机到手机、计算机再到高复杂的宇航电子仪器等。本章将介绍挠性印制电路板及刚挠结合印制电路板相关的基本知识、制造工艺技术以及未来的发展趋势。

1.1 挠性印制电路板概述

大多数人对挠性电路或挠性印制电路比较陌生，然而它们却是现代电气互联技术中出现最早的技术之一。早在 1898 年发表的英国专利中就有记载在石蜡纸基板上制作的平面导体。数年后，托马斯·爱迪生在与助手交换的实验记录中描述的概念使人联想到现在的厚膜技术。在 20 世纪初，科研工作者设想和发展了多种新的方法来使挠性印制电路技术得到应用，但直到 20 世纪中期，用于汽车仪表盘仪器线路的连接才推动了挠性电路的批量生产。

20 世纪 70 年代末期，以日本厂商为主导，逐渐将挠性印制电路板(flexible printed circuit board, FPCB, 简称为 FPC)广泛应用于计算机、照相机、打印机、汽车音响、硬盘驱动器等电子信息产品中。20 世纪 90 年代初期，挠性电路又翻开了历史的新篇章，冷战的结束使得一些推动美国挠性电路行业发展的军用挠性电路产品消失，美国的挠性电路在很大程度上依赖于军队的需求。20 世纪 90 年代以后，在可携带型消费电子产品追求轻薄设计的背景下，挠性印制电路板的应用领域得到了极大拓展，手机、掌上电脑、笔记本电脑、数码相机、数码摄像机、卫星定位装置、平板显示、IC 封装、汽车电子等都是其主要应用市场，甚至近年来涌现出的很多高科技电子产品也大量采用了 FPC 或刚挠结合板。

2011 年全球 PCB 产值约 554 亿美元，其中 FPC 产值为 92 亿美元，占 PCB 总产值 16.6%，预计到 2016 年 FPC 总产值将达到 132 亿美元，在 PCB 产值中所占比例上升至 18.4%。近年来，4G 技术、RFID、新型显示技术和全印制电子技术的成熟和广泛应用，给 FPC 提供了一个更为广阔的发展空间。因此，挠性印制电路板行业前景诱人，属于朝阳产业。

1.1.1 挠性印制电路板的定义及分类

相对于用刚性基材制成的刚性印制电路板(rigid printed board, 又称硬板)而言，FPC 是指用挠性绝缘基材制成的印制电路板，可以有或无覆盖层，又称为柔性板或软板。绝缘基材一般使用具有可挠曲性的薄膜，如聚四氟乙烯、聚酰亚胺、聚酯等，外面再粘上一层铜箔，其特点是可以实现动态和静态的挠曲、配线密度高、质量轻、厚度薄，具有高可靠性、高挠曲性。图 1-1 为一块双面挠性印制电路板的结构示意图。